

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Abril 2013 | InvestigacionyCiencia.es
Edición española de SCIENTIFIC AMERICAN
COMPUTACIÓN
Algoritmos de aprendizaje automatizado
CAMBIO GLOBAL
Funciones del bosque mediterráneo
COSMOLOGÍA
Púlsares y ondas gravitacionales
Las NEURONAS de la MEMORIA
¿Cómo se organizan las células que almacenan nuestros recuerdos?
00439
9 770210 136004
6,50 EUROS

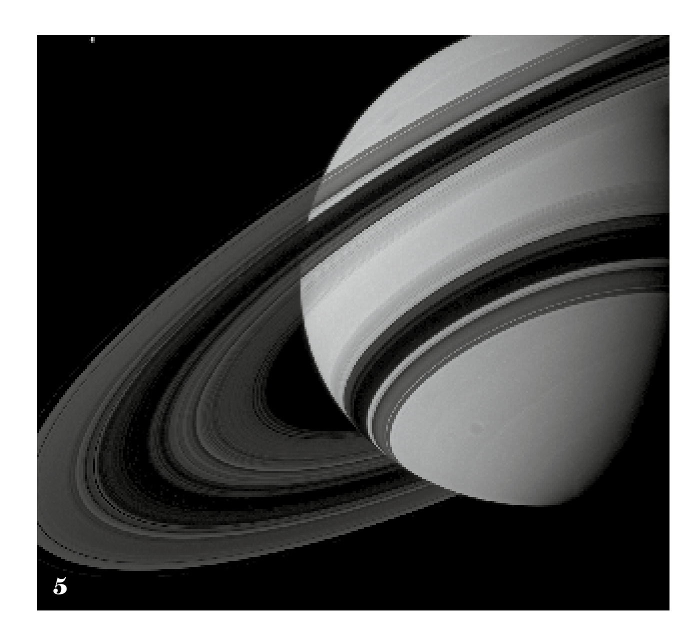
INVESTIGACIÓN Y CIENCIA
Abril 2013, Número 439



82

ADAM VOORHES

ARTÍCULOS


5


48

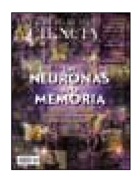

86

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

SECCIONES

EN PORTADA

Conocer el modo en que el cerebro codifica los recuerdos constituye desde hace tiempo uno de los grandes misterios de la ciencia. Algunos estudios han demostrado que cuando pensamos en una persona conocida se activan grupos reducidos de neuronas. Esta arquitectura neural hace que el cerebro funcione con mayor eficacia que si cada recuerdo estuviera distribuido a lo largo de muchos millones de neuronas. Imagen de Jean-François Podevin.



redaccion@investigacionyciencia.es



Septiembre y octubre 2012

CONTROL DEL VIH

En «El secreto de los controladores de élite» [Investigación y Ciencia, septiembre de 2012], Bruce D. Walker relata que Bob Massie, cuyo sistema inmunitario había logrado mantener el VIH bajo control, fue sometido a un trasplante de hígado. Si a consecuencia de ello se viese obligado a tomar fármacos inmunodepresores, ¿no supondrían estos una amenaza para sus linfocitos T coadyuvantes y, por tanto, para el control del VIH?

Charles Capwell

Responde Walker: *Massie comenzó a tomar medicación contra el VIH a fin de asegurar que los fármacos inmunodepresores no ponían en peligro su capacidad para controlar el virus.*

¿QUIÉN ES EL HUÉSPED?

En «La benevolencia de los agujeros negros» [Investigación y Ciencia, octubre de 2012], Caleb Scharf habla sobre los agujeros negros supermasivos que residen en el interior de las grandes galaxias, como ocurre en la Vía Láctea. Pero ¿estamos seguros de cuál es el anfitrión y cuál el «invitado»?

Francis Jones
Amarillo, Texas

Responde Scharf: *Dos de los mayores misterios relativos a los agujeros negros supermasivos atañen a su procedencia y al momento en que se formaron. Existen datos que muestran con claridad que dichos agujeros negros datan de la época en que comenzaron a gestarse las galaxias y las estrellas. Por tanto, se diría que ya habitaban en el seno de las galaxias o en los grandes fragmentos de materia que se estaban agregando para formar galaxias aún mayores. Parece improbable que los mayores de estos objetos hayan tenido tiempo de crecer a partir de agujeros negros menores, con masas próximas a la de una estrella, lo que sugiere que ya desde sus inicios hubieron de presentar un tamaño considerable.*

Una de las teorías propuestas para describir su formación sostiene que, en un universo joven y pobre en elementos químicos, las condiciones reinantes en las regiones densas del interior de las galaxias podrían haber provocado el nacimiento de agujeros negros con masas comprendidas entre 100.000 y un millón de masas solares. Después estas «semillas» podrían haber crecido con rapidez mientras la galaxia se agrupaba y la gravedad atraía materia fría del universo circundante. Por tanto, la relación entre una galaxia y su agujero negro supermasivo tal vez pueda describirse como «simbiótica».

EFECTO MPEMBA

En las distintas explicaciones sobre los motivos por los que el agua caliente se congela antes que la fría [«Golpe frío al calor», por J.-M. Courty y É. Kierlik; Investigación y Ciencia, octubre de 2012] no recuerdo haber visto ninguna que considerase el papel de los puentes de hidrógeno. El agua caliente posee menos de estos enlaces, por lo que sus moléculas serían «piezas de puzle» más fáciles de ensamblar que las del agua fría. En esta última, los puentes de hidrógeno dificultarían que las moléculas encajasen durante la formación de los cristales de hielo.

Alberto Bellido de la Cruz
Málaga

Responde Kierlik: *La pregunta de nuestro lector se basa en la posibilidad de interpretar el efecto Mpemba en términos de la estructura del agua líquida. Dicha explicación ha sido propuesta por D. Auerbach («Supercooling and the Mpemba effect»,* American Journal of Physics, *vol. 63, núm. 10, 1995) y por M. Chaplin (www.lsbu.ac.uk/water/abstrct.html).*

La estructura del agua varía de manera considerable con la temperatura. Justo por encima de los 0 ºC, sus moléculas se hallan fuertemente ligadas por puentes de hidrógeno y forman agregados icosaédricos difícilmente compatibles con la estructura del hielo ordinario. A medida que la temperatura aumenta, los puentes de hidrógeno se debilitan por efecto de la agitación térmica. Una consecuencia sería que el sobreenfriamiento del agua (la persistencia de la fase líquida a temperaturas inferiores a 0 ºC) resultaría menor cuando el proceso se inicia con agua caliente, por lo que esta se convertiría en hielo a una temperatura más elevada que el agua fría (aunque siempre inferior a 0 ºC) y así se explicaría que congelase antes. M. Balážovič y B. Tomášik resumen esta y otras posibilidades en «The Mpemba effect, Shechtman's quasicrystals and student exploration activities», Physics Education*, vol. 47, 2012.*

Nos mostramos poco convencidos por semejante interpretación. Esta no toma en cuenta que el enfriamiento del agua corresponde a un proceso lento. En un congelador ordinario, un litro de agua fría tarda horas en convertirse en hielo. Resulta difícil creer que en ese tiempo las moléculas no puedan reorganizarse, establecer puentes de hidrógeno y formar los agregados icosaédricos mencionados. (Como referencia, para obtener agua vítrea —sólida pero de estructura amorfa— a partir de agua líquida, se requieren velocidades de enfriamiento del orden de 10^5 kelvin por segundo.) No hay razón para pensar que, en torno a los 0 ºC, el agua que comenzó el proceso a mayor temperatura deba exhibir una estructura diferente de la que lo hizo estando fría. Hemos de confesarlo: para nosotros, el efecto Mpemba continúa siendo un misterio.

CARTAS DE LOS LECTORES

Investigación y Ciencia agradece la opinión de los lectores. Le animamos a enviar sus comentarios a:
PRENSA CIENTÍFICA, S.A.
Muntaner 339, pral. 1.ª, 08021 BARCELONA
o a la dirección de correo electrónico:
redaccion@investigacionyciencia.es

La longitud de las cartas no deberá exceder los 2000 caracteres, espacios incluidos. Investigación y Ciencia se reserva el derecho a resumirlas por cuestiones de espacio o claridad. No se garantiza la respuesta a todas las cartas publicadas.

Erratum corrige

En el artículo del mes de marzo «El lado oscuro de las nuevas tecnologías», de Alfredo Rodríguez Muñoz, se decía que la red social Facebook contaba con más de «un billón» de usuarios. La cifra correcta es mil millones.

MEDIOAMBIENTE

Negocios sucios

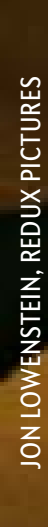
La región septentrional de Alberta alberga arenas bituminosas, un vasto depósito de un petróleo espeso y pesado cuya producción resulta de las más nocivas en cuanto a la emisión de gases de efecto invernadero. En el último decenio, Canadá se ha convertido en el principal proveedor de petróleo importado de los Estados Unidos, por delante de Arabia Saudí. Más de la mitad de ese petróleo proviene de esa reserva, del tamaño del estado de Florida, el único lugar del mundo en el que el crudo se obtiene de minas y no de perforaciones. Si el presidente Barack Obama aprobase la construcción del oleoducto Keystone XL, el flujo hacia los Estados Unidos de petróleo de arenas bituminosas (bitumen) aumentaría.

Obtener más petróleo de Canadá resulta políticamente ventajoso, porque reduce la dependencia de Estados Unidos con respecto a la OPEP. El bitumen, sin embargo, hace pagar un alto precio al ambiente. En comparación con el petróleo árabe tradicional, emite el doble de gases de efecto invernadero por barril, debido a los recursos necesarios para procesarlo. Aunque tiene un rendimiento energético neto positivo, ya que proporciona entre 7 y 10 unidades térmicas británicas (BTU) de energía por cada BTU que se invierte en las arenas bituminosas, el rendimiento es menor que el del petróleo obtenido de forma tradicional. Una vez que se extrae el material, el bitumen requiere grandes cantidades de agua calentada con gas para derretirlo y separarlo de los granos de arena a los que se halla unido. En ese momento, el bitumen sigue siendo demasiado espeso para fluir, por lo que debe manipularse químicamente con calor y presión para convertirlo en petróleo bruto amarillento, gasóleo, combustible para reactores u otros hidrocarburos típicos. También puede diluirse con hidrocarburos ligeros líquidos para transformarlo en «dilbit» («bitumen diluido») de color negro, que puede transportarse por oleoducto hasta los Estados Unidos.

Algunos ambientalistas consideran que la explotación de las arenas petrolíferas podría llevar el calentamiento global a un punto de inflexión desastroso. En un análisis sobre la forma de restringir el calentamiento hasta un máximo de dos grados centígrados por encima de los niveles preindustriales, la Agencia Internacional de la Energía sugirió que la producción de arenas bituminosas no debería superar los 3,3 millones de barriles al día. Pero la producción aprobada supera hoy los cinco millones de barriles al día, un hecho que según James Hansen, climatólogo de la NASA, está llevando al límite el cambio climático.

Aun así, el verdadero desafío consiste en reducir el uso de todos los combustibles fósiles, no solo del petróleo. Las centrales térmicas de carbón de los Estados Unidos producen diez veces más dióxido de carbono que las arenas petrolíferas de Alberta. Si bien las emisiones de esas centrales han comenzado a disminuir, la Asociación Canadiense de Productores de Petróleo señala que la contaminación de dióxido de carbono procedente de arenas petrolíferas ha aumentado un 36 por ciento desde 2007. Mientras los Estados Unidos sopesan la construcción del oleoducto Keystone XL, el problema de la explotación de las arenas bituminosas se va haciendo cada vez más complicado.

—David Biello



ASTRONOMÍA

La teoría de los anillos

Como dijo Carl Sagan, «si quieres hacer un pastel de manzana desde cero, primero debes inventar el universo». Y si quieres hacer una luna desde cero, según investigaciones recientes, primero debes crear planetas con anillos —después de inventar el universo, por supuesto.

La Luna de la Tierra podría haberse formado a partir de un sistema de anillos desaparecido hace mucho tiempo, similar a los anillos que rodean Saturno en la actualidad; lo mismo sucede con muchos de los satélites que orbitan en torno a los demás planetas. La mayor parte de los satélites regulares del sistema solar, aquellos que se mantienen cerca de su planeta en órbitas aproximadamente ecuatoriales, se originaron de esta manera, en lugar de surgir simultáneamente a los planetas como resultado directo de la formación planetaria, según las conclusiones de un grupo de astrofísicos franceses. Los investigadores describieron sus hallazgos en el número de noviembre de 2012 de *Science*.


Los anillos de Saturno

A través de modelos teóricos, Aurélien Crida, de la Universidad Sophia-Antipolis de Niza, y Sébastien Charnoz, de la Universidad Diderot de París, han descubierto que el proceso de formación lunar comienza en el extremo de un anillo planetario, donde un satélite puede constituirse sin ser despedazado por la atracción gravitatoria del planeta. Allí van surgiendo pequeñas lunas a partir del material que compone el anillo, antes de emigrar hacia el exterior. A medida que el sistema de anillos expulsa una pequeña luna tras otra, las mismas se fusionan para formar lunas mayores, que también pueden fusionarse a su vez, conforme se van alejando del planeta en una trayectoria en espiral.

Ello explicaría un elemento clave que es común a los satélites regulares de Saturno, Urano y Neptuno: las lunas situadas más lejos de su planeta respectivo tienden a tener una masa superior a las de sus vecinas de las regiones inferiores. Como una bola de nieve que rueda ladera abajo, las lunas que se forman se hacen cada vez mayores a medida que se alejan del planeta y sus anillos, fusionándose una y otra vez. El resultado final es un sistema de satélites bien ordenado, con pequeñas lunas en la zona interior, formadas a partir de un número reducido de fragmentos, y grandes lunas en el exterior, creadas a partir de numerosos satélites.

Los planetólogos suelen pensar que un impacto gigante sufrido por la Tierra recién formada emitió una gran nube de materiales que se convirtió en nuestra Luna. Según la teoría de Crida y Charnoz, esos materiales primero se convirtieron en un anillo en torno al planeta, el cual luego se extendió y se congregó para dar lugar a la Luna.

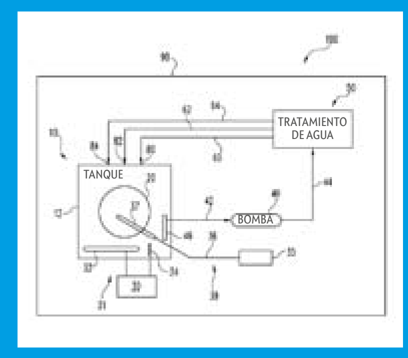
La nueva hipótesis no carece de problemas. Por ejemplo, si una vez hubo grandes sistemas de anillos similares a los de Saturno en torno a Neptuno y Urano, ¿dónde están ahora? «Tenemos algunas ideas, pero ninguna convincente», señala Crida. «Sin embargo, creo que podemos encontrar buenas razones para la desaparición de los anillos, y los satélites constituyen un buen indicio.»

—John Matson

PATENTES

Un método para cultivar coral: Los corales vivos constituyen una impresionante adquisición para un acuario marino, pero obtenerlos de la naturaleza supone una amenaza ecológica para los escasos arrecifes coralinos. El cultivo o acuicultura de corales podría ayudar a solucionar el problema, especialmente en los Estados Unidos, donde los aficionados compran el 80 por ciento del coral vivo que se vende en el mundo. Una de las dificultades para cultivar coral consiste en reproducir las fuertes corrientes multidireccionales creadas por las olas y mareas que necesitan los organismos de los arrecifes para prosperar. Karen Spartz, propietaria de un negocio de acuicultura en Indiana, ha ideado una solución.

La patente número 8.267.045 describe un sistema que imita un entorno marino mediante el control de la composición química del agua, su temperatura y el uso de la luz natural para cultivar multitud de organismos, como estrellas de mar, anémonas, peces y corales. Muchas de esas técnicas se utilizan de modo habitual en el negocio de la acuicultura, pero Spartz añadió una gran bandeja giratoria. La bandeja, con forma de rueda, se mantiene a flote con pequeñas boyas y se equilibra gracias a la distribución de los corales cultivados. Una sola bomba hace que el agua fluya a través de un refugio (un subtanque separado del tanque principal pero que comparte el agua con él) donde hay algas que filtran y limpian el agua. Una serie de aberturas adecuadamente dispuestas conducen el agua de vuelta al tanque principal y hacen que gire la bandeja, con lo que se crea una corriente constante para los organismos acuáticos. «Al coral le gusta la turbulencia», afirma Spartz.



La patente de Spartz también propone una variación: una bandeja con velas impulsadas por un ventilador. Esta configuración eólica podría utilizarse para cultivar organismos como caballitos de mar o nudibranquios, que no soportan un flujo directo de agua, afirma David Baker, profesor adjunto de biología en la Universidad de Hong Kong.

—Marissa Fessenden

CORTESÍA DE NASA/JPL-CALTECH/SPACE SCIENCE INSTITUTE; OFICINA DE PATENTES Y MARCAS REGISTRADAS DE EE.UU. *(sistema para cultivo marino)*

EXPLORACIÓN ESPACIAL

Siestas espaciales

¿Cuántos ingenieros hacen falta para cambiar una bombilla?

La pregunta no es un chiste para la NASA, que está invirtiendo 11,4 millones de dólares para cambiar los viejos fluorescentes del segmento estadounidense en órbita de la Estación Espacial Internacional. Cuando la NASA empezó a pensar en remplazar las luces, los médicos se dieron cuenta de que tenían la oportunidad de abordar un problema totalmente distinto: el insomnio de los astronautas.



La confusión causada por la falta de sueño es una molestia en la Tierra, pero resulta peligrosa en el espacio. Aunque su horario permite ocho horas y media de sueño al día, los astronautas apenas duermen seis horas de media, afirma Smith Johnston, oficial médico y cirujano de vuelo de la NASA. La combinación de flotación, ruido, temperatura variable, mala circulación del aire, dolores de espalda y de cabeza, y un nuevo amanecer cada noventa minutos confunde los ritmos circadianos. La agencia espacial estadounidense espera solucionar al menos parte del problema con unas nuevas lámparas.

Los especialistas en sueño han descubierto que, cuando unos receptores de luz específicos en nuestros ojos se exponen a una determinada longitud de onda de luz azul, nos sentimos más alerta porque el cerebro inhibe la melatonina, una hormona clave en la regulación del sueño. En cambio, la luz de la zona roja del espectro permite su circulación.

Las nuevas lámparas, fabricadas por Boeing, se componen de un arcoíris de más de cien bombillas LED atenuadas por un difusor, de modo que parecen un único panel de luz blanca, explica Debbie Sharp, directiva de Boeing. Las lámparas tienen tres modos de funcionamiento, cada uno con una tonalidad ligeramente distinta: la luz blanca es para la visión general, una luz más fría, con un tono azul, promueve el estado de alerta, y una luz más cálida y rojiza favorece la somnolencia. Boeing y sus subcontratistas esperan entregar 20 lámparas en 2015.

Mientras tanto, científicos de instituciones como la Escuela de Medicina de Harvard y la Universidad Thomas Jefferson están comprobando la eficacia de las lámparas.

Algún día, la tecnología podría extenderse también a la Tierra, quizá para la iluminación de hospitales, submarinos nucleares, fábricas o aulas escolares. «El simple hecho de que llevemos años utilizando luces fluorescentes no significa que sea la mejor opción», afirma Elizabeth Klerman, colaboradora del estudio de Harvard. *—Katie Worth*

FISIOLOGÍA

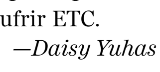
Efecto del deporte en el cerebro

El casco protege la cabeza de los jugadores de fútbol americano y de los soldados, pero no puede evitar del todo los daños del cerebro al golpearse contra el cráneo después de un impacto. Una serie de estudios han relacionado este tipo de traumas repetitivos con una devastadora enfermedad cerebral. El 2 de diciembre de 2012, un grupo de investigadores de la facultad de medicina de la Universidad de Boston, el Departamento de Asuntos de los Veteranos de los Estados Unidos y otras instituciones publicaron sus resultados en línea en la revista *Brain* sobre los cambios provocados por la encefalopatía traumática crónica (ETC). El análisis ofrece la descripción más detallada hasta el momento de la patología y sus diferencias con otras dolencias neurodegenerativas, como la enfermedad de Alzheimer.

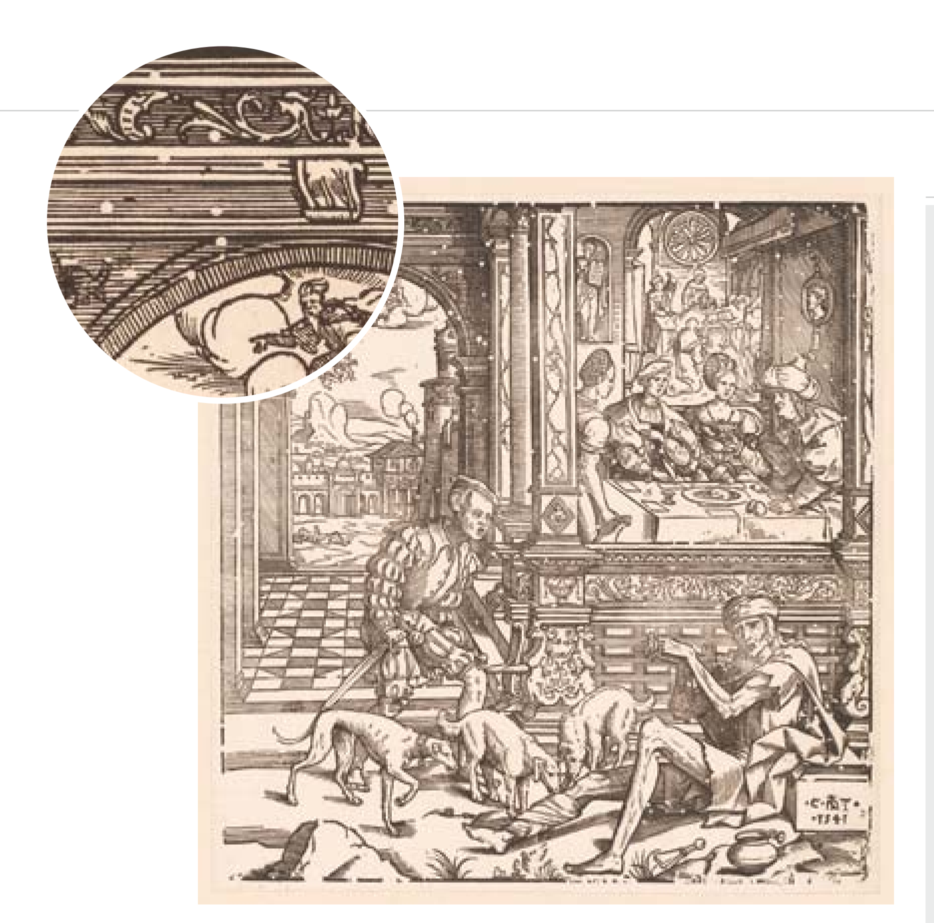


Los investigadores analizaron muestras cerebrales procedentes de autopsias de 85 personas, incluidos deportistas y excombatientes con antecedentes de lesiones cerebrales traumáticas. Las muestras revelaron el curso progresivo de la enfermedad en el cerebro, con la presencia de marañas de proteínas tau, un indicio de deterioro cognitivo que está asociado también a la enfermedad de Alzheimer. En la ETC, sin embargo, las marañas aparecen en regiones distintas del cerebro y se extienden de una forma irregular característica. Las anomalías iniciales parecen reflejar la lesión física, y el trabajo con modelos animales sugiere que el avance de la enfermedad puede guardar relación con los intervalos entre lesiones: cuando el tiempo transcurrido no es suficiente para que el tejido se cure, cada impacto posterior daña aún más el cerebro.

El estudio refuerza la idea de que las lesiones cerebrales presentes en los deportistas contribuyen a esta enfermedad. De las 85 personas analizadas, 68 habían sufrido ETC y, de estas últimas, 64 habían jugado a deportes de contacto, como el fútbol americano o el *hockey*. Sin embargo, el estudio no explica por qué otras personas con antecedentes similares carecen de los signos de la enfermedad. Ann McKee, neuropatóloga del Centro Médico de Veteranos Bedford, en Massachusetts, y autora del estudio, señala la urgencia de realizar más investigaciones para averiguar la causa, tal vez de origen genético, de la predisposición de algunas personas a sufrir ETC.


—Daisy Yuhas

THOMAS FUCHS (*bombilla espacial*); GETTY IMAGES (*casco*)



Imperfecciones: Huellas de gusano en los grabados.

BIOLOGÍA

Escarabajos xilófagos

Los agujeros de gusano no solo sirven para viajar en el tiempo o para la teleportación. Algunos agujeros reales y muy antiguos están ayudando a descifrar la distribución de especies de insectos y de obras de arte en el pasado. La novedosa idea se atribuye a un biólogo que se vio implicado en el insólito mundo de las xilografías europeas de siglos de antigüedad. Allí descubrió que muchas de las pequeñas imperfecciones en las xilografías permitían identificar las especies de insectos que habían perforado la superficie de la plancha de madera original antes de imprimir el grabado. Al hacer corresponder las dimensiones de los agujeros con el momento y el lugar en los que se realizaron las xilografías, el científico, Blair Hedges, profesor en la Universidad estatal de Pensilvania, ha obtenido un registro histórico de la distribución de escarabajos xilófagos en Europa, una información desconocida hasta ahora. Hedges publicó sus resultados en febrero en la revista *Biology Letters*.

El investigador ha bautizado ese hallazgo como el «registro histórico de agujeros de gusano». Los escarabajos adultos ponen huevos en las grietas de la plancha. Cuando las larvas eclosionan, se introducen lentamente en la madera y pasan tres o cuatro años allí, alimentándose de celulosa. Una vez transformadas en escarabajos adultos, excavan un túnel para salir de la madera, con lo que se originan los agujeros que se observan en tantas xilografías.

El científico estudió 3263 agujeros de gusano en 473 xilografías creadas entre 1462 y 1899. Descubrió que había dos tamaños de agujeros: algunos medían unos 2,3 milímetros de diámetro y otros unos 1,4 milímetros. Y se podía distinguir un patrón geográfico: los de menor tamaño pertenecían a xilografías realizadas en el noreste del continente europeo, mientras que los de mayor tamaño se hallaban en las del suroeste. Así pudo deducir la especie de cada escarabajo: la carcoma común (*Anobium punctatum*) al noreste y la carcoma mediterránea (*Oligomerus ptilinoides*) al suroeste. El método de Hedge podría ayudar a analizar la distribución de especies xilófagas y a obtener un registro histórico en todo el mundo, lo que permitiría identificar los cambios en poblaciones locales y el momento en que aparecen especies invasoras. La técnica podría contribuir también a resolver algunos misterios del mundo del arte, como los orígenes de un libro o de una xilografía.

—Katherine Harmon

AGENDA

CONFERENCIAS

17 de abril
Cuando la nanotecnología se encuentra con la medicina
Raúl Pérez Jiménez (CIC nanoGUNE)
Ciclo «Nanotecnología: El gran reto de lo pequeño»
Universidad del País Vasco
Campus de Leioa
www.nanogune.eu > Events

17 de abril
La amenaza de las especies invasoras sobre la biodiversidad de las Islas Galápagos
Anna Traveset, CSIC y Universidad de las Islas Baleares
Ciclo «La geografía de la vida. Centenario de la muerte de Alfred Russel Wallace»
Octubre Centro de Cultura Contemporánea
Valencia
www.octubre.cat

24 de abril
Los libros de astronomía que han cambiado la visión del universo
Marta Folgueira, UCM
Seminario de Historia de la Matemática
Facultad de Ciencias Matemáticas
Universidad Complutense de Madrid
Madrid
www.mat.ucm.es

EXPOSICIONES

Ars Mechanicae. Ingeniería medieval en España
Casa de las Ciencias
Logroño
www.logroño.es/casadelasciencias

OTROS

Los miércoles de abril - Ciclo
El debate sobre los límites de la ciencia y el estudio de fenómenos paranormales
Coordinado por Annette Mülberger, Centro de Historia de la Ciencia (UAB)
Instituto de Estudios Catalanes
Barcelona
blocs.iec.cat/arban > Programas

4 de abril – Neuroconcierto
Banda sonora original: música, emoción y memoria
Judith Domínguez-Borràs, Universidad de Ginebra
Joaquim Rabaseda, ESMUC
Manel Camp (piano), Horacio Fumero (contrabajo), Matthew Simon (trompeta)
Paraninfo
Universidad de Barcelona
www.ub.edu/neuroub

BARÓMETRO

Riesgos en alza

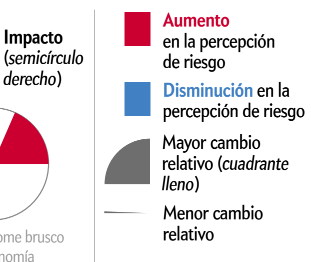
Una encuesta a dirigentes revela una creciente preocupación por las consecuencias de la ciencia y la tecnología

La economía lleva años encabezando titulares, pero las consecuencias imprevistas de las ciencias de la vida y de la mitigación del cambio climático comienzan a pesar en la mentalidad colectiva. Expertos del Foro Económico Mundial y líderes de la industria han calibrado la probabilidad y el posible impacto de 50 riesgos de importancia mundial (el *Informe sobre riesgos globales* de 2013 se publicó en enero). Hemos ordenado cada peligro en función de cuánto ha cambiado su valoración durante el pasado año (con el mayor aumento combinado de probabilidad estimada e impacto potencial en el ángulo superior izquierdo); el color naranja señala los relacionados con la ciencia y la tecnología. Destacan sobre todo la demografía, la desaparición de especies, las armas de destrucción masiva, la contaminación y las tecnologías de la información. El cambio climático, incluidos los temores sobre las emisiones de gases de efecto invernadero y la adaptación, también tiene un peso importante.

—*Fred Guterl*

Los contadores muestran la estimación del riesgo de 50 problemas mundiales

1 Desplome brusco de una economía emergente
2 Consecuencias imprevistas de nuevas tecnologías en las ciencias de la vida
3 Consecuencias imprevistas de la mitigación del cambio climático
4 Mala gestión del envejecimiento poblacional
5 Consecuencias negativas imprevistas de la regulación
6 Desequilibrios crónicos del mercado laboral
7 Nacionalización unilateral de recursos
8 Crecimiento insostenible de la población
9 Incremento del fanatismo religioso
10 Inflación o deflación incontrolables
11 Proliferación de armas de destrucción masiva
12 Persistencia de condiciones climáticas extremas
13 Sobreexplotación de especies
14 Fracaso de la gobernabilidad global
15 Inadaptación al cambio climático
16 Militarización del espacio
17 Fracaso de la resolución diplomática de conflictos
18 Vulnerabilidad del suministro de recursos minerales
19 Colapso financiero sistémico
20 Aumento de las emisiones de gases de efecto invernadero
21 Desinformación digital masiva
22 Políticas ineficaces contra drogas ilegales
23 Destrucción geofísica sin precedente
24 Fracaso del régimen de propiedad intelectual
25 Contaminación irremediable
26 Reacción antiglobalización
27 Migraciones incontroladas
28 Graves desigualdades de ingresos
29 Tasas crecientes de enfermedades crónicas
30 Mala gestión urbanística
31 Incidencia masiva del fraude/robo de datos
32 Vulnerabilidad frente a pandemias
33 Extrema volatilidad de precios agrícolas y energéticos
34 Arraigo de la corrupción generalizada
35 Ataques cibernéticos
36 Mala gestión de tierras y acuíferos
37 Proliferación de la basura espacial
38 Consecuencias imprevistas de la nanotecnología
39 Crisis hídricas
40 Desequilibrios fiscales crónicos
41 Vulnerabilidad frente a tormentas geomagnéticas
42 Comercio ilícito generalizado
43 Resistencia a los antibióticos
44 Fallo de sistemas fundamentales
45 Terrorismo
46 Arraigo del crimen organizado
47 Abandono prolongado de infraestructuras
48 Crisis de liquidez recurrentes
49 Crisis de escasez de alimentos
50 Países frágiles críticos



Orden según la magnitud del *cambio*, desde el mayor aumento a la mayor disminución, en el riesgo total (combinación de probabilidad e impacto) entre 2012 y 2013

Aumento en la percepción de riesgo

Disminución en la percepción de riesgo

Mayor cambio relativo (*cuadrante lleno*)

Menor cambio relativo

El tamaño del círculo refleja la importancia relativa del riesgo estimado al combinar los grados de probabilidad e impacto

FUENTE: FORO ECONÓMICO MUNDIAL; JAN WILLEM TULP (*gráficos*)

ASTROFÍSICA

Nuevos indicios de la existencia de ondas gravitacionales

Un sistema binario de enanas blancas descubierto hace poco se revela como un «laboratorio perfecto» para poner a prueba la teoría de la relatividad de Einstein

Las ondas gravitacionales constituyen una de las predicciones básicas de la teoría de la relatividad. Del mismo modo que el electromagnetismo nos enseña que una carga eléctrica acelerada radia ondas electromagnéticas (es decir, luz), la relatividad general predice que una masa en movimiento acelerado debería emitir radiación gravitatoria: perturbaciones locales en la estructura del espaciotiempo que se propagarían en forma de ondas.

Hasta ahora, sin embargo, ningún experimento ha logrado detectar ondas gravitacionales de manera directa. La interacción gravitatoria es tan débil que medir dichas perturbaciones requiere una sensibilidad técnica extrema, muy difícil de alcanzar en los laboratorios terrestres. Aunque en la actualidad existen varios proyectos en curso y, de cara al futuro, se han diseñado complejas misiones espaciales basadas en interferometría láser entre satélites, la observación directa de ondas gravitacionales probablemente se haga esperar unos años.

Con lo que sí contamos desde hace un tiempo es con algunas pruebas indirectas de su existencia. La última de ellas fue obtenida el año pasado. En una colaboración internacional en la que participó Antonio Cabrera Lavers, del Gran Telescopio Canarias (GTC), y el autor, hallamos nuevos indicios de la emisión de ondas gravitacionales en un sistema compuesto por dos enanas blancas. Los resultados fueron publicados el pasado mes de septiembre en *The Astrophysical Journal Letters*.

¿Hacia dónde mirar?

Las fuentes estables más intensas de radiación gravitatoria las hallamos en los sistemas binarios formados por dos objetos compactos, como agujeros negros, estrellas de neutrones o enanas blancas. En ellos, cuerpos de masas formidables sufren aceleraciones extremas asociadas al movimiento orbital, por lo que deberían emitir una cantidad considerable de energía en forma de ondas gravitacionales. Como consecuencia de esa fuga energética, su período orbital (el tiempo que los cuerpos tardan en describir una órbita en torno al centro de masas común) debería experimentar una disminución paulatina [*véase* «Púlsares y ondas gravitacionales» por Michael Kramer y Norbert Wex, *en este mismo número*].

En 1974, Rusell A. Hulse y Joseph H. Taylor descubrieron el púlsar PSR B1913+16. Un púlsar es una estrella de neutrones que rota sobre sí misma con gran rapidez y que posee un intenso campo magnético. Aunque tales objetos giran sobre su eje de manera muy regular, Hulse y Taylor observaron que el período de rotación de PSR B1913+16, de unos 59 milisegundos, variaba ligeramente con un período de 7,75 horas. Dichas alteraciones se debían a que, en realidad, se trataba de un sistema binario: el objeto orbitaba en torno a una segunda estrella de neutrones a una velocidad comprendida entre 100 y 450 kilómetros por segundo.

Desde entonces se ha venido observando que dicho sistema, así como otros similares descubiertos con posterioridad, experimenta una reducción progresiva de su período orbital. Dicha disminución coincide con las predicciones relativistas de pérdida de energía por radiación gravitacional, motivo por el que Hulse y Taylor recibieron el premio Nobel de física en 1993.

Laboratorio ideal

En 2011, en una colaboración con investigadores de las universidades de Harvard y Texas, descubrimos la existencia de un sistema binario formado por dos enanas blancas situadas a unos 3000 años luz de la Tierra. Identificado como J0651+2844 debido a sus coordenadas celestes, las masas de las estrellas ascendían a 0,25 y 0,5 masas solares y su período orbital era de tan solo 12,75 minutos.



NASA/CASEY REED (ADAPTACIÓN)

De acuerdo con la teoría de la relatividad general, los sistemas binarios formados por objetos compactos, como los que muestra esta recreación artística, deberían emitir una enorme cantidad de energía en forma de ondas gravitacionales. La observación de una pérdida de energía en una pareja de enanas blancas descubiertas recientemente ha permitido corroborar de manera indirecta esta suposición.

La velocidad de los objetos en órbita alcanzaba los 600 kilómetros por segundo, lo cual implicaba que debían sufrir aceleraciones muy violentas. Nuestros cálculos demostraron que dicho sistema debía constituir la segunda fuente de radiación gravitacional más intensa conocida en frecuencias del milihercio. Además, las enanas blancas se encontraban bien separadas, por lo que no intercambiarían materia. Ello las convertía en un sistema perfecto para medir la reducción del período orbital asociado a la emisión de ondas gravitacionales.

La casualidad ha querido que el plano orbital de J0651+2844 se encuentre alineado con la línea de visión desde la Tierra. Por tanto, en cada órbita se producen dos eclipses, gracias a lo cual el período orbital del sistema —y sus pequeñas variaciones— puede obtenerse con gran precisión a partir de simples imágenes. Cada vez que una estrella pasa por delante de la otra, la luz que llega a la Tierra disminuye hasta un 20 por ciento, lo que convierte al sistema en un cronómetro de gran precisión situado a miles de años luz.

Desde el descubrimiento de dicho sistema binario, los investigadores que participamos en el proyecto hemos concentrado nuestros esfuerzos en estudiarlo con detalle. A tal fin hemos utilizado telescopios en Hawái, Nuevo México y Texas; además del GTC, en la isla de La Palma. Gracias a la gran capacidad colectora de su espejo primario, de 10,4 metros, este último tomó las medidas con la cadencia más rápida: una imagen cada diez segundos, lo cual nos permitió registrar con gran precisión el momento de los eclipses. Tras más de 200 horas de observación acumuladas entre todos los instrumentos, hemos podido comprobar sin ambigüedades que el sistema reduce su período orbital a un ritmo de 0,26 milisegundos al año, un resultado que concuerda con las predicciones teóricas.

Si la pérdida de energía por emisión de ondas gravitacionales no existiese, las enanas blancas orbitarían siempre a una distancia constante. Sin embargo, la disminución del período orbital nos indica que ambas estrellas se acercan una a la otra, por lo que de manera inexorable acabarán colisionando dentro de unos pocos millones de años.

—Carlos Allende Prieto
Instituto de Astrofísica de Canarias

MICROBIOLOGÍA

Cables eléctricos bacterianos

Las reacciones geoquímicas en la superficie de los sedimentos marinos se acoplan con las de las capas más profundas mediante filamentos bacterianos

Hace tan solo unos años, cualquier sugerencia de que los microorganismos pudieran funcionar como cables conductores de más de un centímetro de longitud, y así transmitir corrientes eléctricas, se habría recibido con escepticismo. Pues bien, Christian Pfeffer, de la Universidad de Aarhus, y sus colaboradores han demostrado ese fenómeno en un artículo publicado en noviembre de 2012 en la revista *Nature*. Los investigadores han observado que en los sedimentos marinos cuyas reacciones geoquímicas están acopladas mediante corrientes eléctricas abundaba un grupo de bacterias filamentosas hasta ahora desconocido.

Parte del oxígeno atmosférico disuelto en las aguas oceánicas se difunde hacia los sedimentos y crea una región óxica que favorece el crecimiento de microorganismos aerobios. Estos consumen el oxígeno con rapidez, que emplean como aceptor final de los electrones generados durante la descomposición de materia orgánica. El consumo de oxígeno es tan rápido que se agota antes de que pueda difundirse por completo en los sedimentos. Ese proceso microbiano estratifica los sedimentos en una capa superficial con oxígeno (la zona óxica) y una capa inferior sin oxígeno mucho más profunda (la zona anóxica). Esta última alberga microbios anaerobios que utilizan otros aceptores de electrones finales, como el sulfato (SO_4^{2-}), para satisfacer sus demandas metabólicas y energéticas. El empleo de sulfato como aceptor de electrones metabólicos genera sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas especialmente tóxico para los microorganismos aerobios. Pero la concentración de ese gas se controla gracias a la actividad de ciertos microorganismos que lo convierten en sulfato u otros compuestos oxidados de azufre. Su acción evita el ascenso del sulfuro de hidrógeno hasta la zona óxica y mantiene una separación de milímetros, o incluso centímetros, entre ambas.

A pesar de tal separación, las capas óxica y sulfhídrica de los sedimentos se hallan íntimamente conectadas. Así, una disminución de la concentración de oxígeno en la capa superior da lugar de inmediato a una acumulación de sulfuro de hidrógeno y a una extensión de la región sulfhídrica. De la misma forma, en cuanto el oxígeno se difunde de nuevo en la parte superior del sedimento, el consumo de sulfuro de hidrógeno se incrementa y la capa sulfhídrica remite. Debido a la gran rapidez de respuesta, se descarta la existencia de mecanismos basados en la difusión de moléculas. El fenómeno solo puede explicarse si el acoplamiento de las dos reacciones es mediado por corrientes eléctricas. Estas podrían ser transmitidas por apéndices conductores bacterianos (los llamados nanocables microbianos), por compuestos sólidos con capacidad de aceptar y donar electrones (como las sustancias húmicas que se generan durante la descomposición de materia orgánica) o por minerales conductores. Sin embargo, los datos experimentales sugieren que esos mecanismos permiten la transmisión de corrientes eléctricas a distancias del orden de nano- a micrómetros, mientras que las capas óxica y sulfhídrica están separadas por milímetros o incluso centímetros de sedimento.

En su artículo, Pfeffer y sus colaboradores describen que los sedimentos marinos sulfhídricos se hallan densamente colonizados por largos filamentos bacterianos multicelulares. Alcanzan longitudes (algunos hasta 1,5 centímetros) similares a las distancias que separan las capas óxica y sulfhídrica. Los resultados de sus experimentos demuestran que los filamentos son necesarios para el acoplamiento eléctrico de ambas capas. Así, cuando cortaron transversalmente los sedimentos (y consigo, los filamentos) o insertaron filtros para impedir el acceso de los filamentos a la capa sulfhídrica, el consumo de oxígeno en la región óxica se redujo notablemente y la capa sulfhídrica aumentó de grosor.

Los filamentos pertenecen a la familia Desulfobulbaceae, un grupo bacteriano de morfologías diversas. Algunos miembros de la familia producen y consumen sulfuro de hidrógeno en reacciones localizadas en el periplasma, el espacio celular comprendido entre las membranas interna (o citoplasmática) y externa. Cabe destacar que la membrana externa de los microorganismos filamentosos es ondulada, con crestas y depresiones. Las crestas de la membrana dan lugar a canales tubulares de periplasma a lo largo de las células y forman conexiones entre células vecinas. Aunque la membrana externa de las células y conexiones intercelulares es aislante, su contenido se halla cargado eléctricamente. Esas propiedades estructurales y eléctricas hacen pensar que los filamentos funcionan como cables eléctricos por medio de los conductos periplásmicos.

Los investigadores proponen un modelo en el que las células de uno de los extremos del filamento se especializarían en la oxidación del sulfuro de hidrógeno y transmitirían los electrones generados en esa reacción a las células consumidoras de oxígeno, localizadas en el extremo opuesto del filamento. Si bien el modelo metabólico es posible, la idea de que un filamento multicelular de al menos un centímetro de longitud funcione como un cable eléctrico desafía el conocimiento actual sobre los mecanismos biológicos que permiten la transmisión de electrones. No obstante, se sabe que el periplasma de algunas bacterias reductoras de metales posee un alto contenido en metaloproteínas, en su mayoría citocromos, los cuales facilitan la transmisión de electrones desde la membrana interna a la externa. Esas bacterias pueden formar biopelículas conductoras, de varios micrómetros de grosor, mediante la secreción de citocromos y nanocables en la matriz polisacarídica que rodea a las células. Valiéndose de mecanismos semejantes —pero contenidos en los canales tubulares de periplasma de las células y en sus conexiones intercelulares—, los filamentos de las Desulfobulbaceae podrían también transmitir corrientes eléctricas.

El estudio de Pfeffer y sus colaboradores plantea además cuestiones interesantes sobre el papel ecológico de esas bacterias. De confirmarse su presencia generalizada y abundancia en sedimentos marinos sulfhídricos, los cables bacterianos podrían constituir el mecanismo principal para el transporte de corrientes eléctricas a través de los sedimentos. Sin embargo, los experimentos descritos en este estudio no descartan la participación de otros microorganismos en el fenómeno. Cuando los investigadores cortaron los filamentos o impidieron su crecimiento con filtros, podrían haber afectado la integridad y el funcionamiento de otras redes eléctricas microbianas. Por lo tanto, para determinar la contribución exacta de los filamentos en las corrientes eléctricas de los sedimentos, resultará fundamental confirmar el desplazamiento de los electrones a través de los filamentos y medir la velocidad de transmisión. Otra cuestión ecológica de importancia se refiere a la capacidad de los filamentos de consumir un gas tan tóxico como el sulfuro de hidrógeno. De demostrarse, esa capacidad podría permitir a las bacterias competir por los recursos nutritivos de su ecosistema, e incluso facilitar la cooperación metabólica con otros microorganismos.

Por último, cabe mencionar otras posibles funciones de los cables bacterianos, además de desintoxicar el medio de sulfuro de hidrógeno. De hecho, podrían contribuir a otros procesos biológicos de transferencia de energía y al acoplamiento de otras reacciones químicas de los sedimentos. Según se ha descrito con anterioridad, el consumo de sulfuro de hidrógeno en algunos sedimentos no es lo bastante elevado como para explicar los niveles de consumo de oxígeno medidos en la capa óxica. Ello sugiere que, además de la oxidación del sulfuro de hidrógeno, otras reacciones podrían hallarse acopladas eléctricamente a la reducción de oxígeno.

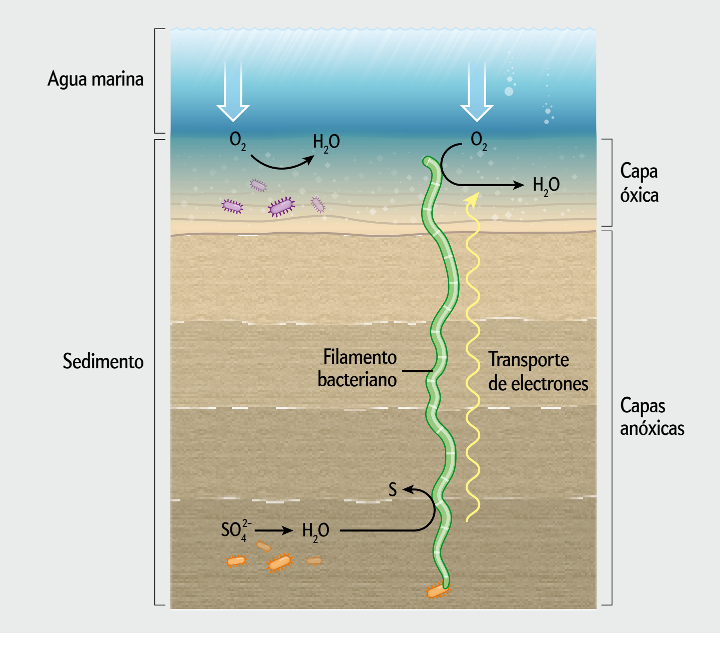
El estudio de Pfeffer aporta nuevas pruebas sobre el papel crucial de las reacciones microbianas de transferencia de electrones en procesos globales geoquímicos y en el funcionamiento de los ecosistemas. La microbiología atraviesa sin duda un momento excitante, y este trabajo nos recuerda una vez más los numerosos secretos que todavía quedan por descubrir.

—Gemma Reguera
Dpto. de microbiología y genética molecular
Universidad estatal de Michigan

Artículo original publicado en *Nature* 491, págs. 8-9, 2012. Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd. © 2012

REACCIONES EN CADENA

Los microorganismos de las capas superiores de los sedimentos marinos (*morado*) emplean el oxígeno (O_2) que se difunde del agua marina como aceptor de los electrones producidos por el metabolismo celular de generación de energía. Los microbios de las capas más profundas y anóxicas (con poco o nada de oxígeno) (*naranja*) tienen que usar otros aceptores de electrones como el sulfato (SO_4^{2-}) para crecer. La transferencia de electrones al oxígeno genera agua, mientras que la transferencia de electrones al sulfato genera sulfuro de hidrógeno (H_2S), un gas tóxico para numerosos organismos. Un estudio sugiere que unos filamentos bacterianos transportarían los electrones generados durante la conversión de sulfuro de hidrógeno en azufre (S) en las capas profundas y los utilizarían para consumir oxígeno en la región superior.



Los diez mayores consumidores de agua dulce (millones de metros cúbicos al año)

CHINA (1.368.004)
INDIA (1.144.605)
EE.UU. (821.354)
BRASIL (355.374)
RUSIA (270.490)
INDONESIA (232.239)
PAKISTÁN (199.429)
MÉXICO (197.425)
JAPÓN (174.779)
NIGERIA (157.336)

Uso
Doméstico
Industria
Agricultura
Cereales
Carne
Otros (leche, huevos, fruta, aceites, frutos secos, azúcar, goma, etc.)

SOSTENIBILIDAD

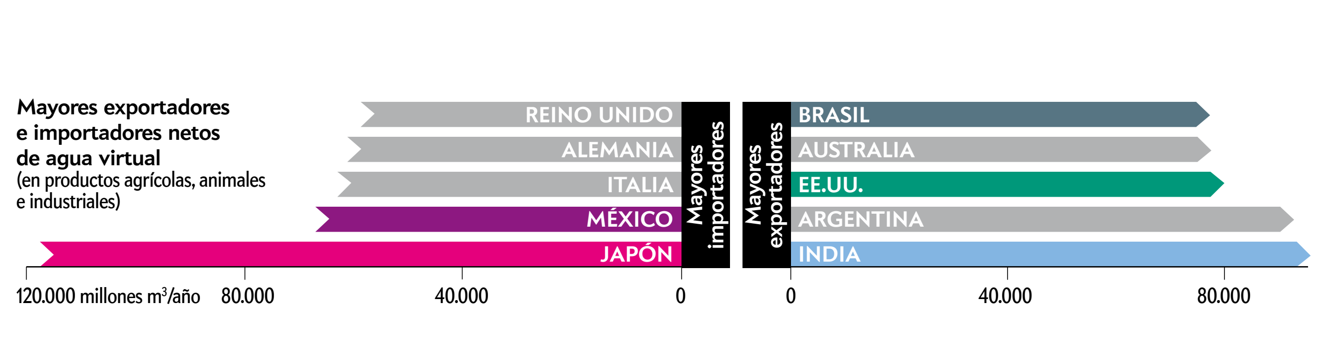
Importación y exportación del agua

Gran parte de este recurso, necesario para la vida, es objeto de comercio internacional

Se utiliza una enorme cantidad de agua para producir la comida y los productos que consumen los países (*arriba*). Una población numerosa constituye el factor más importante, pero una agricultura poco eficiente, o la dependencia de una cocina que requiera un uso intensivo de agua, también pueden exacerbar la demanda. El consumo de carne, por ejemplo, causa el 30 por ciento del gasto hídrico estadounidense.

Algunos países, como la India y los Estados Unidos, también exportan cantidades significativas de agua en forma de alimentos y otros productos (*abajo a la derecha*), a sumar a su importante consumo interno. Los países muy poblados con un territorio reducido (Japón) o con poca agua (México) son grandes importadores netos (*abajo a la izquierda*).

Estas reflexiones vienen de Arjen Y. Hoekstra y Mesfin M. Mekonnen, ingenieros de la Universidad de Twente. A largo plazo, los exportadores netos podrían alterar sus políticas comerciales para evitar crear una escasez de agua en su propio territorio o elevar los precios para reflejar el coste de unos recursos hídricos cada vez más escasos. Los países poco eficientes en su gestión podrían mejorar sus prácticas agrícolas. Y los importadores netos podrían reducir sus exportaciones, con el fin de ahorrar para el consumo nacional. —*Mark Fischetti*



FUENTE: «THE WATER FOOTPRINT OF HUMANITY», POR ARJEN Y. HOEKSTRA Y MESFIN M. MEKONNEN, EN *PROCEEDINGS OF THE NATIONAL ACADEMY OF SCIENCES USA*. PUBLICADO EN LÍNEA EL 13 DE FEBRERO DE 2012; JEN CHRISTIANSEN (*gráficos*)

ÓPTICA

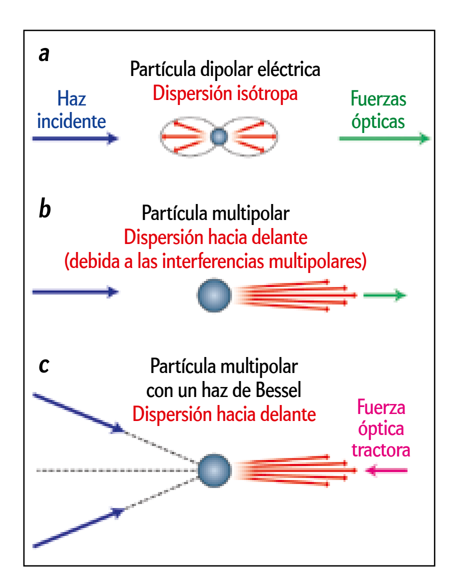
Rayos láser tractores

Una novedosa propuesta para generar fuerzas ópticas que arrastren los objetos hacia la fuente de luz

La capacidad de la luz para empujar objetos viene fascinando a los científicos desde hace siglos. En 1619, Johannes Kepler postuló la existencia de dicho fenómeno para explicar por qué la cola de los cometas apuntaba siempre en sentido opuesto al Sol. La idea subyacente, que parte de la base de que la luz se compone de pequeñas partículas, concuerda con lo que hoy sabemos sobre la naturaleza de las fuerzas ópticas: la luz transporta energía, momento lineal y momento angular, por lo que tales magnitudes pueden transferirse a átomos, moléculas y partículas. Ello permite entender con facilidad que la presión de radiación acelere dichos cuerpos en el mismo sentido en que fluye la luz. En un trabajo publicado en septiembre de 2011 en la revista *Nature Photonics*, Jun Chen y otros colaboradores de la Universidad de Ciencia y Tecnología de Hong Kong y de la Universidad Fudan, en Shanghái, plantearon la posibilidad de acelerar partículas *en contra* del flujo de fotones. El fenómeno, nada intuitivo, ha sido bautizado como «fuerza de tracción óptica».

Los primeros indicios experimentales de la acción mecánica de la luz se remontan a principios del siglo xx. Sin embargo, no fue hasta 1970 cuando los experimentos pioneros de Arthur Ashkin demostraron la aceleración y captura de pequeños objetos dieléctricos mediante la presión de radiación. En 1986, Ashkin y otros colaboradores desarrollaron las pinzas ópticas, una técnica derivada de las trampas ópticas de un solo haz. Desde entonces, el empleo de haces de luz para manipular moléculas y partículas de poco tamaño se ha convertido en uno de los pilares de la investigación en biología, química física y física de la materia condensada blanda.

Cuando los objetos implicados son mucho menores que la longitud de onda de la luz incidente, los principios básicos de la manipulación óptica resultan sencillos de entender. En tales casos, y al igual que ocurre en electrostática, el campo eléctrico de la luz induce sobre la partícula un dipolo eléctrico. Dicho dipolo experimenta dos fuerzas que compiten entre sí: por un lado, el arrastre provocado por el gradiente de la intensidad de campo; por otro, la presión de radiación debida al momento lineal transferido por los fotones del haz. En el espacio libre, la presión de radiación es proporcional al vector de Poynting, el cual determina la dirección y la magnitud del flujo de momento. Por último, en campos de elipticidad no uniforme, aparece también una fuerza no conservativa, proporcional al rotacional del momento angular asociado al espín de la luz. Una manipulación adecuada de la interferencia entre láseres permite generar vórtices de luz, vectores de Poynting y patrones de espín complejos. Pero, a pesar de ello, nada de lo anterior puede lograr que la partícula se acelere en la dirección de la fuente; es decir, en contra del flujo de fotones.



Dispersión de la luz y fuerzas ópticas sobre partículas dipolares y multipolares. En el caso de partículas dipolares de tamaño reducido (*a*), la dispersión es isótropa. Debido a la conservación del momento total, la fuerza neta sobre la partícula posee el mismo sentido que el haz incidente. En el caso de partículas multipolares iluminadas por un haz de luz muy colimado (*b*), los fenómenos de interferencia pueden provocar que la luz dispersada se focalice en el sentido del haz, lo cual reduce la magnitud de la fuerza neta hacia delante. Por último, si inciden varios frentes de onda bajo un cierto ángulo (*c*), la presión de radiación «tradicional» se aproximará a cero y la contribución de la dispersión hacia delante provocará un efecto neto tractor.

Interferencias multipolares

Por otro lado, las partículas de mayor tamaño pueden desarrollar no solo dipolos eléctricos, sino también dipolos magnéticos y multipolos de orden superior. En tal caso, y como consecuencia de ciertos efectos de interferencia muy intensos, el campo radiado puede exhibir una fuerte focalización hacia delante (en el sentido del haz incidente), lo cual contrasta con el patrón isótropo característico de un pequeño dipolo eléctrico. Dado que el momento total debe conservarse, cuanto más se focaliza la dispersión hacia delante, menor resulta la fuerza neta en el sentido del haz incidente. Para un haz láser muy colimado (una onda plana), el efecto de interferencia sobre una partícula multipolar no basta para contrarrestar la fuerza ejercida por la presión de radiación. Pero, tal y como refieren Chen y sus colaboradores, si la proyección del momento total de los fotones a lo largo de la dirección de propagación es pequeña, podremos generar una fuerza neta contraria al flujo de potencia óptica.

Consideremos el caso de dos ondas planas que inciden con un cierto ángulo (*véase la ilustración*). A medida que este aumenta, la presión de radiación tenderá a cero (para entender por qué, piénsese que dos haces que se propagan en sentidos opuestos no ejercerán presión de radiación alguna). Sin embargo, la contribución procedente de la dispersión hacia delante no se anula. Podemos imaginar la partícula como una lente que captura fotones con un cierto ángulo de incidencia con respecto al eje del haz y vuelve a emitirlos luego en una dirección paralela a dicho eje. A partir de cierto ángulo, la conservación del momento dará lugar a una fuerza neta que apunta hacia la fuente de luz.

Para llevar su idea a la práctica, los investigadores proponen utilizar un haz de Bessel, el cual puede entenderse como una combinación de ondas planas que forman un cono con respecto al eje de propagación. Entre otras particularidades, el perfil de intensidad de un haz de Bessel permanece constante a lo largo del eje de propagación incluso cuando

se focaliza en una sección transversal de escala comparable a la longitud de onda. Los haces de Bessel han sido empleados para construir trampas ópticas de varios milímetros de longitud a lo largo del eje óptico, así como para empujar partículas con gran precisión sobre largas distancias. A pesar de que la apertura finita del sistema de lentes impone limitaciones sobre el alcance del haz, la propuesta de Chen y sus colaboradores tal vez permita construir haces tractores que actúen sobre partículas situadas relativamente lejos (a distancias macroscópicas) de la fuente de luz.

Pinzas de alta precisión

Dado que la tracción óptica guarda una estrecha relación con los fenómenos de interferencia entre campos multipolares, cabe preguntarse qué clase de partículas podrían experimentar dichos efectos. En su artículo, los investigadores apuntaban la posibilidad de emplear esferas de poliestireno con un índice de refracción relativamente bajo. Para una longitud de onda dada, concluyen que las interferencias necesarias solo se obtendrían para ciertos intervalos de tamaños muy particulares. Y viceversa: una vez fijado el radio de las esferas, la tracción solo aparecería en regímenes espectrales muy concretos. Por tanto, aunque el haz tractor propuesto por los investigadores no permitiría atraer cualquier cuerpo, la técnica deja entrever posibilidades fascinantes en procesos de selección de partículas de acuerdo a su tamaño.

Los autores también han analizado los efectos de la tracción óptica sobre partículas con respuesta magnética y eléctrica; es decir, aquellas para las que tanto su permeabilidad magnética como su permitividad dieléctrica son distintas de cero. En 1983, Kerker y otros investigadores predijeron la existencia de efectos de dispersión sorprendentes (relacionados con la supresión o minimización de la dispersión hacia atrás, o retrodispersión) en aquellos dispersores dipolares simples en los que ambos parámetros eran iguales. Como cabría esperar, la tracción óptica analizada por Chen y sus colaboradores también se optimiza cuando la permeabilidad magnética del material se aproxima a la permitividad dieléctrica. Sin embargo, aún no se conoce ningún material con estas propiedades en la región del espectro visible o en el infrarrojo.

En fecha reciente se ha demostrado que ciertas esferas semiconductoras de radio submicrométrico exhiben una respuesta tanto magnética como eléctrica. En tales casos, la interferencia entre los campos dipolares eléctricos y magnéticos puede resultar en una emisión de radiación con una distribución angular anisótropa, lo que incluye tanto la ausencia de retrodispersión como una dispersión hacia delante casi nula para longitudes de onda específicas. En nanopartículas plasmónicas, se han observado fenómenos de interferencia similares entre las resonancias eléctricas dipolares y cuadrupolares, los cuales dan lugar a una fuerte dispersión hacia delante cuando se emplean longitudes de onda concretas.

Por último, cabe señalar que dichas partículas podrían adherirse a objetos casi transparentes, como algunas macromoléculas biológicas, lo cual permitiría aplicar sobre dichos cuerpos los efectos de la tracción óptica. En definitiva, los resultados de Chen y sus colaboradores no solo suponen un gran avance en nuestra comprensión de las fuerzas ópticas, sino que probablemente acaben ejerciendo un impacto notable en un campo tan interdisciplinar como el de la manipulación óptica.

Nota: El pasado mes de enero, P. Zemánek y otros investigadores del Instituto de Instrumentos Científicos de la República Checa presentaron en la revista *Nature Photonics* la primera demostración experimental de fuerzas de tracción óptica sobre pequeñas partículas. Dos meses antes, la corroboración empírica de la asimetría de la radiación dispersada por partículas dieléctricas había sido publicada en *Nature Communications* por una colaboración internacional de la que formaba parte el autor.

—Juan José Sáenz
Centro Internacional de Física de San Sebastián
Departamento de física de la materia condensada
Universidad Autónoma de Madrid

Artículo original publicado en *Nature Photonics*.
Traducido con el permiso de Macmillan Publishers Ltd.

BIOTECNOLOGÍA

Proteómica dirigida

El análisis dirigido de proteomas, básico en la investigación biológica, ha ganado el título de método del año 2012. Se presenta aquí una visión general de las técnicas de espectrometría de masas empleadas con este fin

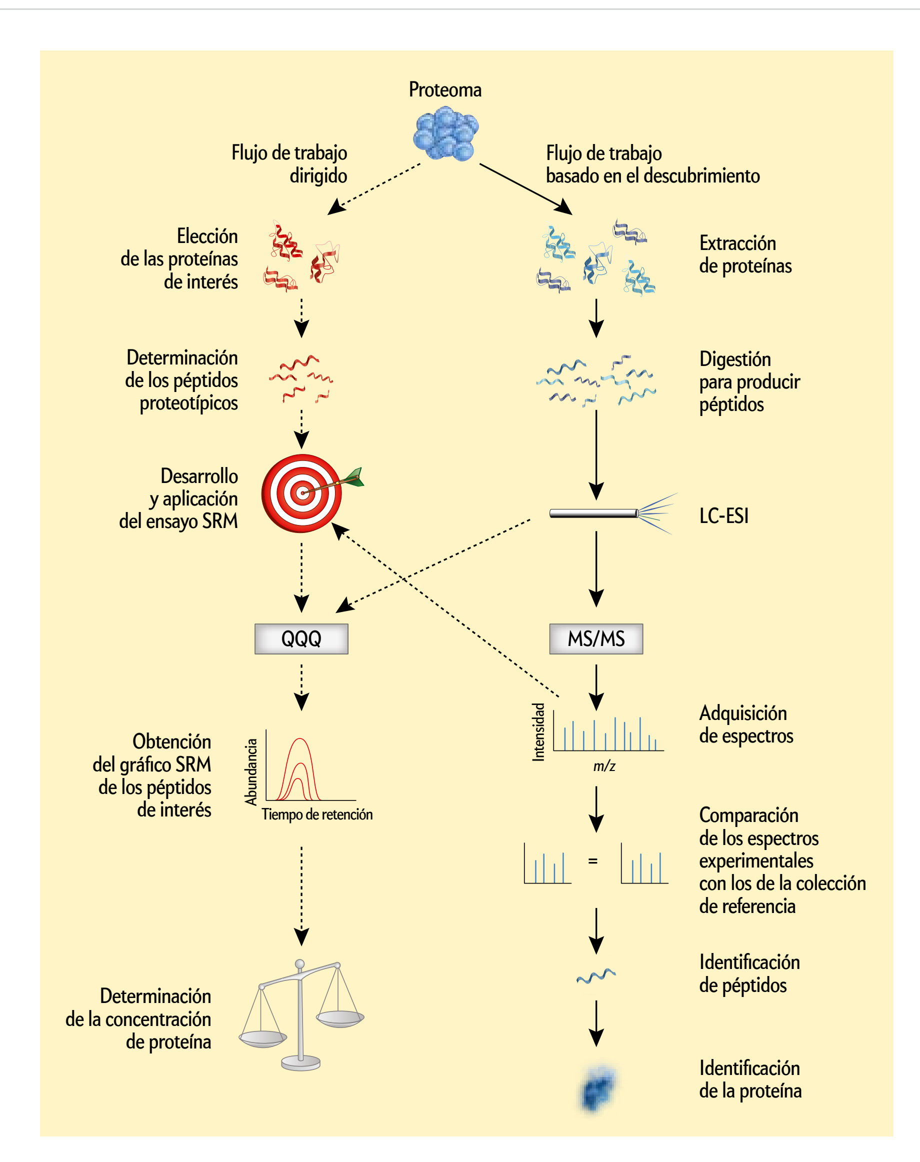
El análisis de proteomas puede llevarse a cabo mediante diversas técnicas, pero podría decirse que la más potente es la espectrometría de masas. Para estudiar proteomas hay dos estrategias fundamentales basadas en la espectrometría de masas: la identificación basada en una estrategia de exploración (o descubrimiento) y la cuantificación dirigida.

Descubrir o monitorizar

La estrategia de descubrimiento se usa habitualmente con el objetivo de identificar tantas proteínas como sea posible. En cambio, en un experimento de proteómica dirigida, el objetivo consiste en monitorizar con una alta sensibilidad, reproducibilidad y precisión cuantitativa unas pocas proteínas de interés.

En ambas estrategias, las proteínas se extraen de la muestra mediante métodos bioquímicos; a continuación, se usa una proteasa que corta las proteínas por determinados aminoácidos y se obtienen péptidos. Los péptidos así generados se analizan por cromatografía líquida acoplada a espectrometría de masas mediante ionización por electronebulización. El espectrómetro de masas determina la razón masa/carga de los iones peptídicos.

En un experimento típico basado en la estrategia de descubrimiento, el espectrómetro de masas selecciona automáticamente los iones peptídicos que van a ser fragmentados, de acuerdo con la intensidad de su señal. La fragmentación genera espectros de masas que contienen información abundante y compleja sobre la secuencia del péptido que se ha fragmentado.



Comparación de los flujos de trabajo en la estrategia dirigida y en la de descubrimiento. (LC-ESI = cromatografía líquida en línea con ionización por electronebulización; MS/MS = espectrometría de masas en tándem; QQQ = triple cuadrupolo; SRM = monitorización selectiva de reacción).

Los espectros de fragmentación se emparejan con los de una colección de espectros generados a partir de bases de datos de secuencias de proteínas. De este modo se deduce la secuencia de los péptidos y, por extensión, la identidad de las proteínas, un proceso que requiere refinadas herramientas bioinformáticas y una cuidadosa inspección de los resultados.

En la estrategia dirigida, el espectrómetro de masas se programa para detectar iones peptídicos específicos derivados de una serie de proteínas. El proceso requiere más inversión previa en su puesta a punto que en el caso de un experimento de descubrimiento, pero una vez que se ha desarrollado un ensayo fiable para una proteína específica, el análisis de los datos de espectrometría de masas es relativamente sencillo.

Una vieja técnica hecha nueva

El triple cuadrupolo (QQQ) es un espectrómetro de masas que se desarrolló hace más de treinta años para el análisis de moléculas de bajo peso molecular. El equipo funciona como un doble filtro de masas que permite seleccionar iones moleculares de masas predeterminadas para ser fragmentados en el propio instrumento. En los últimos años, el uso del QQQ para proteómica dirigida se ha ido extendiendo a medida que los avances metodológicos han popularizado la técnica.

En un análisis de proteómica dirigida, los iones peptídicos entran a través del

primer filtro de masas del QQQ, que puede programarse para seleccionar los iones precursores específicos (basándose en su razón masa/carga) que van a ser fragmentados. En el segundo filtro de masas, los iones producto que se quieren analizar son seleccionados y guiados al detector para su cuantificación, lo que permite generar un gráfico de intensidad de señal frente al tiempo de retención para cada pareja ion precursor-ion producto. Este proceso se denomina monitorización selectiva de reacción (SRM, por sus siglas en inglés) o monitorización de reacción múltiple (MRM).

Los ensayos SRM se establecen mediante la definición de un conjunto característico de fragmentos peptídicos, a modo de coordenadas. Un par detectable ion precursor-ion producto se denomina una «transición», y un conjunto adecuado de transiciones constituye un ensayo SRM para la detección y cuantificación de un péptido específico y, por extensión, de la proteína correspondiente. Añadiendo a la muestra péptidos de referencia marcados con isótopos pesados estables, es posible determinar la concentración absoluta de los péptidos de interés. La técnica SRM permite una cuantificación óptima y simultánea de entre 50 y 100 proteínas.

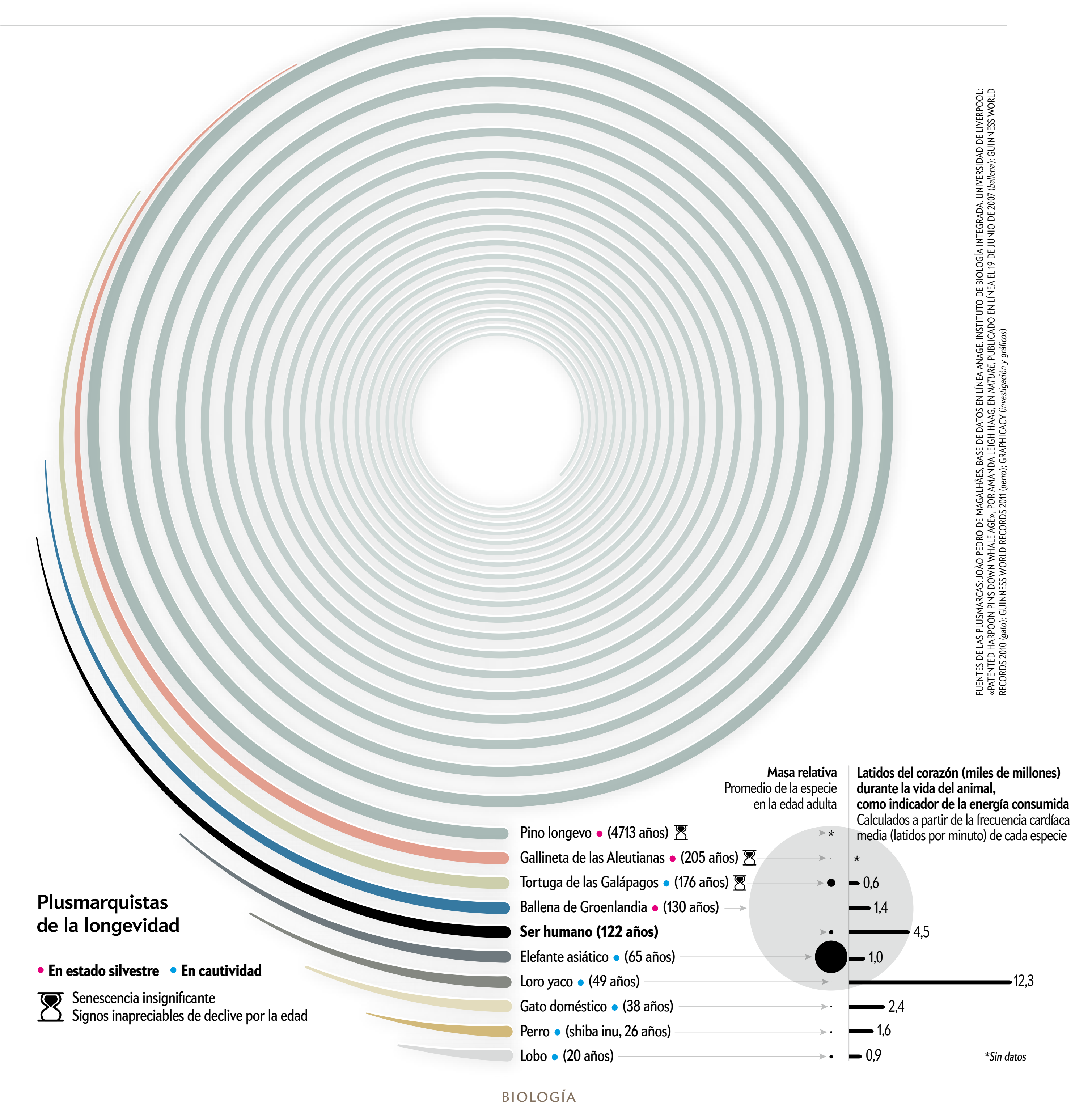
El desarrollo de ensayos SRM suficientemente robustos para la detección y cuantificación fiables de proteínas ha supuesto un cuello de botella en la aplicación de la técnica. No todos los péptidos se analizan igual de bien por espectrometría de masas: algunos se separan, ionizan y detectan mejor que otros debido a sus propiedades fisicoquímicas. Las secuencias de los péptidos también deben elegirse con esmero para asegurar que representan de forma inequívoca la proteína correspondiente. En tiempo reciente se han desarrollado varios algoritmos de predicción y diversos métodos para identificar estos «péptidos proteotípicos», a menudo a partir de la información obtenida de los experimentos realizados mediante la estrategia de descubrimiento. Una vez que se han elegido los péptidos proteotípicos, deben determinarse las transiciones SRM óptimas y validarse rigurosamente. No obstante, una vez puestos a punto, los ensayos SRM pueden emplearse de forma reproducible en diferentes muestras y en distintos laboratorios.

Proteómica dirigida de nueva generación

Si bien la SRM es la técnica basada en espectrometría de masas más consolidada en el análisis dirigido de proteomas, en el horizonte están apareciendo nuevos métodos que no necesitan la laboriosa optimización que requieren los ensayos SRM convencionales. En una técnica reciente llamada SWATH, los complejos espectros de masas generados mediante la adquisición independiente de datos (en la que los péptidos son seleccionados para la fragmentación sin tener en cuenta la intensidad de su señal) son analizados para determinar la presencia de péptidos específicos, mediante la comparación con colecciones de espectros de fragmentación previamente validados. En otra estrategia novedosa, la monitorización de reacción en paralelo, todas las transiciones de cada péptido son monitorizadas de forma simultánea en un único espectro. El desarrollo de nuevos métodos y herramientas informáticas resultará clave para poner la proteómica dirigida al alcance de los biólogos.

—Allison Doerr

Artículo original publicado en el dossier especial «Method of the year 2012» de *Nature Methods*, vol. 10, n.º 1, pág. 23, enero de 2013.



BIOLOGÍA

¿Cuáles son los seres vivos más longevos?

Un indicador clave en los animales correspondería a la energía total consumida a lo largo de la vida

Los estudios tradicionales suponían que la longevidad de un ser vivo era proporcional a su masa corporal y frecuencia cardíaca. De ahí que el corpulento y tranquilo elefante viva más que el pequeño e inquieto ratón. Pero nuevas investigaciones revelan una situación más compleja. Así, los murciélagos y las aves tienden a vivir más que otros animales de más talla. Y cuando se estudia con detalle una especie, se observa una escasa correlación entre el tamaño y la esperanza de vida. Sí se observa, en cierta medida, entre la talla y la tasa metabólica. Pero el mejor indicador sería la energía total consumida durante la vida, que explicaría, por ejemplo, la larga vida del loro yaco. Puede que las respuestas definitivas en este campo tarden aún en llegar, en buena parte porque los estudios requieren mucho tiempo: la vida de una tortuga gigante de las Galápagos puede sobrepasar con creces la carrera de un científico. Por no hablar del milenario pino longevo.

—Fred Guterl



Monopoly
Árbol
Lacasitos
Té
LEGO
Luciérnagas
Torre Eiffel
Perro
Madre
Darth Vader
Buenos Aires
Hermana
Abuela
Columpio
Big Ben
Maradona
Tabla de surf
Jennifer Aniston
Elm Street
Aeropuerto de Atlanta
Mojito

Rodrigo Quian Quiroga es profesor y director del Centro de Neurociencia de Sistemas de la Universidad de Leicester.

Itzhak Fried es profesor de neurocirugía y director del Programa de Cirugía para la Epilepsia de la Escuela de Medicina David Geffen de la Universidad de California en los Ángeles. También es profesor del Centro Médico Sourasky de Tel Aviv y la Universidad de Tel Aviv.

Christof Koch es profesor de biología cognitiva y del comportamiento en el Instituto Tecnológico de California y director científico del Instituto Allen para las Ciencias del Cerebro en Seattle.



NEUROCIENCIA

El archivo de la memoria

Cada concepto, persona o elemento de nuestra vida cotidiana podría tener asignado un grupo de neuronas

Rodrigo Quian Quiroga, Itzhak Fried y Christof Koch

DOMINIQUE BAYNES (*diseño*); DAN SAELINGER (*fotografía*)

EN SÍNTESIS

Durante decenios, los neurocientíficos han venido debatiendo sobre el modo en que se almacenan los recuerdos. La polémica gira hoy en torno a dos teorías. Una de ellas propone la existencia de neuronas individuales que guardan el recuerdo, por ejemplo, de nuestra abuela o una famosa actriz.

La otra teoría afirma que cada recuerdo se halla distribuido a lo largo de millones de neuronas. Experimentos recientes realizados durante neurocirugías han puesto de manifiesto la implicación de grupos reducidos de neuronas de ciertas regiones cerebrales en la codificación de los recuerdos.

Esos pequeños grupos de células representarían a su vez distintas variaciones de un solo concepto, como la imagen del rostro de nuestra abuela o de su cuerpo entero, o bien la visión frontal o de perfil, e incluso la voz, de una estrella de cine como Jennifer Aniston.

El brillante neurocirujano ruso Akakhi Akakhievitch tuvo un paciente que quería olvidar a su autoritaria e insufrible madre. Deseoso de ayudarle, Akakhievitch abrió el cerebro del paciente y, una por una, fue extirpando varios miles de neuronas relacionadas con el concepto de la progenitora. Cuando el paciente despertó de la anestesia, había perdido toda noción sobre su madre. Todos los recuerdos acerca de ella, buenos y malos, se habían esfumado. Lleno de júbilo por su éxito, Akakhievitch dirigió la atención al siguiente reto: la búsqueda de las células asociadas al recuerdo de «la abuela».

La historia, por supuesto, es ficción. El difunto neurocientífico Jerry Lettvin (que, al contrario que Akakhievitch, sí fue real) contó ese relato a un grupo de estudiantes en el Instituto de Tecnología de Massachusetts en 1969. Con él quería ilustrar la idea sugestiva de que un grupo reducido de neuronas, unas 18.000, pudiera constituir la base de cualquier experiencia consciente, pensamiento o recuerdo de un familiar o de cualquier otra persona u objeto. Lettvin nunca demostró ni refutó su audaz hipótesis y, durante más de 40 años, los científicos han estado debatiendo, casi siempre en broma, sobre las «células de la abuela».

La idea de neuronas que almacenan recuerdos de modo tan específico se remonta a William James, quien a finales del siglo xix concibió las «células pontificias», a las cuales se vincularía nuestra consciencia. Sin embargo, la existencia de esas células va en contra de la corriente dominante, según la cual la percepción de cualquier individuo u objeto se realiza mediante la actividad conjunta de muchos millones (incluso miles de millones) de células nerviosas, un fenómeno que el premio nóbel Charles Sherrington denominó en 1940 «democracia de millones». De ser así, la actividad de una sola neurona resultaría inapreciable. Solo la colaboración de enormes poblaciones generaría un significado.

Los neurocientíficos siguen debatiendo si un número reducido de células (unos miles o menos) bastaría para almacenar un determinado concepto, o bien harían falta cientos de millones de ellas distribuidas por todo el cerebro. Los intentos de resolver esta disputa están llevando a un nuevo modo de comprender los mecanismos de la memoria y el pensamiento consciente (con un poco de ayuda de Hollywood).

LAS NEURONAS DE JENNIFER ANISTON

Hace algunos años, en colaboración con Gabriel Kreiman, profesor de la Escuela Médica de Harvard, y Leila Reddy, del Centro de Investigación sobre el Cerebro y la Cognición de Toulouse, realizamos una serie de experimentos en un paciente. En él descubrimos una neurona del hipocampo (región involucrada en los procesos de memoria) que respondía intensamente a diferentes fotografías de la actriz Jennifer Aniston, pero no a las de otra docena de actores, personas famosas, lugares o animales. En otro paciente, una neurona del hipocampo se activó con el visionado de fotografías de la actriz Halle Berry e incluso con su nombre escrito en una pantalla de ordenador, pero no respondía a nada más. Otra neurona iniciaba un impulso solo ante fotos de Oprah Winfrey o a su nombre escrito en la pantalla y pronunciado por una voz generada por ordenador. Y otra se activaba ante fotos de Luke Skywalker y a su nombre escrito y hablado, y así sucesivamente.

Tales observaciones pueden realizarse gracias al registro directo de la actividad de neuronas individuales. Otras técnicas más comunes, como la resonancia magnética funcional, ponen de manifiesto las zonas activas del cerebro cuando un voluntario desempeña una determinada tarea. Pero aunque la resonancia magnética funcional permite monitorizar el consumo de energía global de unos cuantos millones de neuronas, no sirve para identificar grupos reducidos de ellas, y mucho menos células individuales. Para registrar la actividad de una sola neurona deben implantarse en el cerebro microelectrodos más finos que un cabello humano. La técnica resulta menos habitual que la resonancia magnética funcional, y el implante de esos electrodos en humanos solo se permite en circunstancias médicas especiales.

Una de esas circunstancias se da cuando se trata a pacientes con epilepsia. Cuando la medicación no consigue controlar los ataques epilépticos, se recurre en algunos casos a la cirugía. El equipo médico evalúa las pruebas clínicas con el fin de localizar el área donde se inicia el ataque, el foco epiléptico, que podría ser extirpado para curar al paciente. Al principio, la evaluación consiste en procedimientos no invasivos, como la resonancia magnética funcional, el estudio de las pruebas clínicas y el examen de la actividad eléctrica patológica (múltiples descargas epilépticas que se producen de forma simultánea) por medio de registros electroencefalográficos tomados en el cuero cabelludo del paciente. Pero cuando la localización del foco epiléptico no puede determinarse con certeza mediante esos métodos, los neurocirujanos insertan electrodos en capas profundas del cerebro. Monitorizan de manera continua la actividad cerebral en el hospital a lo largo de varios días y luego analizan los ataques identificados.

En ocasiones, los investigadores piden a los pacientes si desean participar en estudios científicos durante los períodos de observación. En ellos se registra la actividad cerebral mientras se solicita al paciente que realice varias actividades cognitivas. En la Universidad de California en Los Ángeles (UCLA), hemos utilizado una técnica original para examinar el interior del cerebro mediante electrodos flexibles conectados con microcables; el método fue desarrollado por uno de nosotros (Fried), que dirige el Programa de Cirugía para la Epilepsia en la UCLA y colabora con científicos de todo el mundo, incluido el grupo de Koch del Instituto de Tecnología de California y el laboratorio de Quian Quiroga en la Universidad de Leicester. La técnica ofrece la extraordinaria oportunidad de registrar directamente y durante días la actividad de neuronas individuales en pacientes despiertos mientras realizan distintas tareas (mirar imágenes en un portátil, evocar recuerdos u otras actividades). Así fue como descubrimos las neuronas de Jennifer Aniston y, sin darnos cuenta, reavivamos el debate iniciado con la parábola de Lettvin [*véase* «El maravilloso cerebroscopio», por Christof Koch; Mente y cerebro 59, 2013].

DE VUELTA A LAS CÉLULAS DE LA ABUELA

¿Corresponden las neuronas de Jennifer Aniston a las tan discutidas células de la abuela? Para responder tal pregunta necesitamos una definición más precisa de ellas. Una visión extrema consistiría en pensar que cada neurona responde a un concepto. Pero si habíamos conseguido dar con una célula que se activaba ante Jennifer Aniston, sin duda debía de haber otras que también lo harían (la probabilidad de hallar la única neurona entre miles de millones es ínfima). Más aún, si una persona poseyera una única neurona responsable del concepto completo de Jennifer Aniston, y la célula fuera dañada o destruida por una enfermedad o un accidente, la persona se olvidaría por entero de la actriz, lo que parece muy improbable.

Una definición menos extrema de las células de la abuela propone que son muchas las neuronas que responden a un concepto. Se trata de una hipótesis verosímil, pero muy difícil, si no imposible, de verificar. No podemos poner a prueba todos los conceptos posibles para demostrar que una neurona se activa únicamente ante Jennifer Aniston. De hecho, sucede lo contrario: a menudo se han identificado neuronas que responden a más de un concepto. Por consiguiente, que una de ellas inicie un impulso ante la imagen de una persona durante un experimento no excluye que pueda hacerlo ante otros estímulos que simplemente no le fueron mostrados.

Una neurona que se activó ante la figura de Luke Skywalker, así como ante su nombre hablado o escrito, también lo hizo ante una imagen de Yoda

Por ejemplo, un día después de descubrir la neurona de Jennifer Aniston repetimos el experimento, esta vez con otras fotos relacionadas con ella, y observamos que la célula también se activaba ante Lisa Kudrow, coprotagonista en la serie de televisión *Friends* que catapultó a ambas actrices a la fama. La neurona que respondía ante Luke Skywalker también lo hacía ante Yoda, otro Jedi de la *Guerra de las galaxias*; una nueva neurona iniciaba un impulso ante dos jugadores de baloncesto; otra, ante uno de los autores de este artículo (Quian Quiroga) y otros investigadores que interactuaron con el paciente en la UCLA. Aun así, podría argumentarse todavía que esas neuronas corresponden a células de la abuela que se activan ante un concepto más extenso, como «las dos rubias de *Friends*», «los Jedis de la *Guerra de las galaxias*», «jugadores de baloncesto» o los «investigadores que realizan experimentos con el paciente». Esta visión más amplia hace que la consideración de esas neuronas como células de la abuela se convierta en una discusión semántica.

Dejemos la semántica de lado por ahora y centrémonos en algunos aspectos cruciales de las llamadas neuronas de Jennifer Aniston. Primero, descubrimos que las respuestas de las células eran bastante selectivas (cada una se activaba ante una pequeña parte de las fotos de famosos, políticos, familiares, lugares, etcétera). Segundo, cada célula respondía a múltiples representaciones de un individuo o lugar en particular, con independencia de las características de la imagen mostrada en la fotografía. De hecho, las células se activaban de un modo similar ante diferentes imágenes de la misma persona, e incluso ante su nombre escrito o hablado. Es como si la neurona nos dijera a través de su patrón de descarga: «Sé que es Jennifer Aniston y no importa cómo me la presentes, ya sea vestida de rojo, de perfil, por su nombre escrito o dicho en voz alta». La neurona parece entonces estar respondiendo al concepto (a cualquier representación de la cosa en sí misma). Por ello, resultaría más apropiado llamarlas células de concepto, en lugar de células de la abuela. A veces se activan ante varios conceptos, pero cuando lo hacen, estos suelen guardar una estrecha relación.

UN CÓDIGO PARA CONCEPTOS

Conocer el modo en que un número reducido de células queda asociado a un concepto en particular, como el de Jennifer Aniston, nos ayuda a entender los complejos procesos que tienen lugar en el cerebro para captar y almacenar imágenes de entre la infinidad de objetos y personas del mundo que nos rodea. La información recogida por los ojos sale del globo ocular por el nervio óptico y se dirige primero a la corteza visual primaria (en la parte posterior de la cabeza). Allí, las neuronas se activan en respuesta a una pequeña parte de todos los detalles que forman la imagen, comparables a los píxeles de una imagen digital o a los puntos coloreados de un cuadro puntillista de Georges Seurat.

No basta con una neurona para saber si el detalle pertenece a una cara, una taza de té o la Torre Eiffel. Cada célula forma parte de un conjunto, una combinación que genera una imagen compuesta, como la que da lugar al cuadro *Tarde de domingo en la isla de la Grande Jatte*. Si la imagen cambia ligeramente, algunos de los detalles variarán, y la descarga del grupo de neuronas correspondiente también lo hará.

El cerebro necesita procesar la información sensorial además de captar una simple fotografía, debe reconocer un objeto e integrarlo con lo que ya sabe. La activación neuronal producida por una imagen en la corteza visual primaria atraviesa una serie de regiones corticales y se dirige hacia aéreas más frontales. En estas áreas visuales superiores existen neuronas que responden a caras completas u objetos enteros y no a detalles locales. Una sola de esas células nos informa de que la imagen corresponde a una cara y no a la Torre Eiffel. Si variamos ligeramente la imagen, la desplazamos o cambiamos su iluminación, modificaremos algunas de sus características, pero las neuronas ignorarán esos pequeños cambios y seguirán activándose más o menos del mismo modo, una propiedad conocida como invariancia visual.

Las neuronas de las áreas visuales superiores envían información al lóbulo temporal medial (hipocampo y áreas corticales adyacentes), zona implicada en las funciones de memoria y lugar donde hallamos las neuronas de Jennifer Aniston. Las respuestas de las células del hipocampo son mucho más específicas que las de la corteza visual superior. Cada una de ellas responde a una persona en particular o, más exactamente, al concepto de esa persona: no solo a la cara o a otras facetas de su aspecto, sino también a otros atributos relacionados con ella, como su nombre.

En nuestras investigaciones hemos intentado identificar el número de neuronas que se activan para representar un determinado concepto. Nos preguntábamos si se trataba de una sola, una docena, miles o tal vez millones. En otras palabras, deseábamos saber cuán «localizada» era la representación de conceptos. Obviamente, no podíamos determinar ese número de manera directa, dado que resultaba imposible registrar la actividad de todas las células de un área concreta. Mediante métodos estadísticos, Stephen Waydo, por aquel entonces estudiante de doctorado de uno de los autores (Koch) en Caltech, estimó que un concepto dado provocaba la descarga de

no más de un millón de neuronas, de las miles de millones presentes en el lóbulo temporal medial. Pero teniendo en cuenta que utilizábamos imágenes de objetos muy familiares para los pacientes (lo que tiende a provocar más descargas), esa cifra debería considerarse un límite máximo; la cantidad de células que representan un concepto puede resultar unas diez o cien veces menor, valor que se aproximaría a las 18.000 neuronas por concepto que Lettvin propuso.

En contra de este argumento, una razón para pensar que el cerebro no codifica conceptos en grupos reducidos de células, sino que los distribuye a lo largo de poblaciones neuronales muy extensas, es que tal vez no haya suficientes neuronas para codificar todos los conceptos posibles y sus variaciones. ¿Poseemos bastantes células para imaginar a nuestra abuela sonriendo, tejiendo, bebiendo té o esperando en la parada del autobús, a la reina de Inglaterra saludando a las multitudes, o a Luke Skywalker en Tatooine o luchando con Darth Vader?

Para responder a esa pregunta, deberíamos tener en cuenta que una persona puede recordar como máximo unos 10.000 conceptos. Una cifra modesta en comparación con los miles de millones de células nerviosas que forman el lóbulo temporal medial. Además, poseemos una buena razón para pensar que los conceptos pueden codificarse y almacenarse muy eficientemente en pocas células. Las neuronas del lóbulo temporal medial ignoran las variaciones de un mismo concepto: pasan por alto si Luke está sentado o de pie, solo responden ante los estímulos que guardan alguna relación con él. Se activan ante el concepto en sí mismo sin importar el modo en que se presenta. Hacer el concepto más abstracto (activarse ante todas las variaciones de Luke) reduce la información que la neurona necesita codificar y la vuelve muy selectiva, con lo que responderá ante Luke, pero no ante Jennifer.

Las simulaciones de Waydo ponen de relieve esa idea. Mediante un modelo detallado del procesamiento visual, Waydo creó un programa informático basado en redes neuronales que aprendió a reconocer numerosas fotografías de aviones, coches, motocicletas y rostros humanos. El programa lo hacía sin la supervisión de un profesor que le dijera «esto es un avión y esto es un coche». Tuvo que figurárselo por su cuenta, partiendo de la hipótesis de que la inmensa variedad de imágenes posibles está basada en un pequeño número de personas o cosas, y estas se hallan representadas por subgrupos de neuronas, tal y como habíamos observado en el lóbulo temporal medial. Mediante la incorporación de esa representación en el programa de simulación, la red aprendió a distinguir personas u objetos, incluso cuando se le mostraban bajo diversas formas, un hallazgo semejante al que obtuvimos con los registros de cerebros humanos.

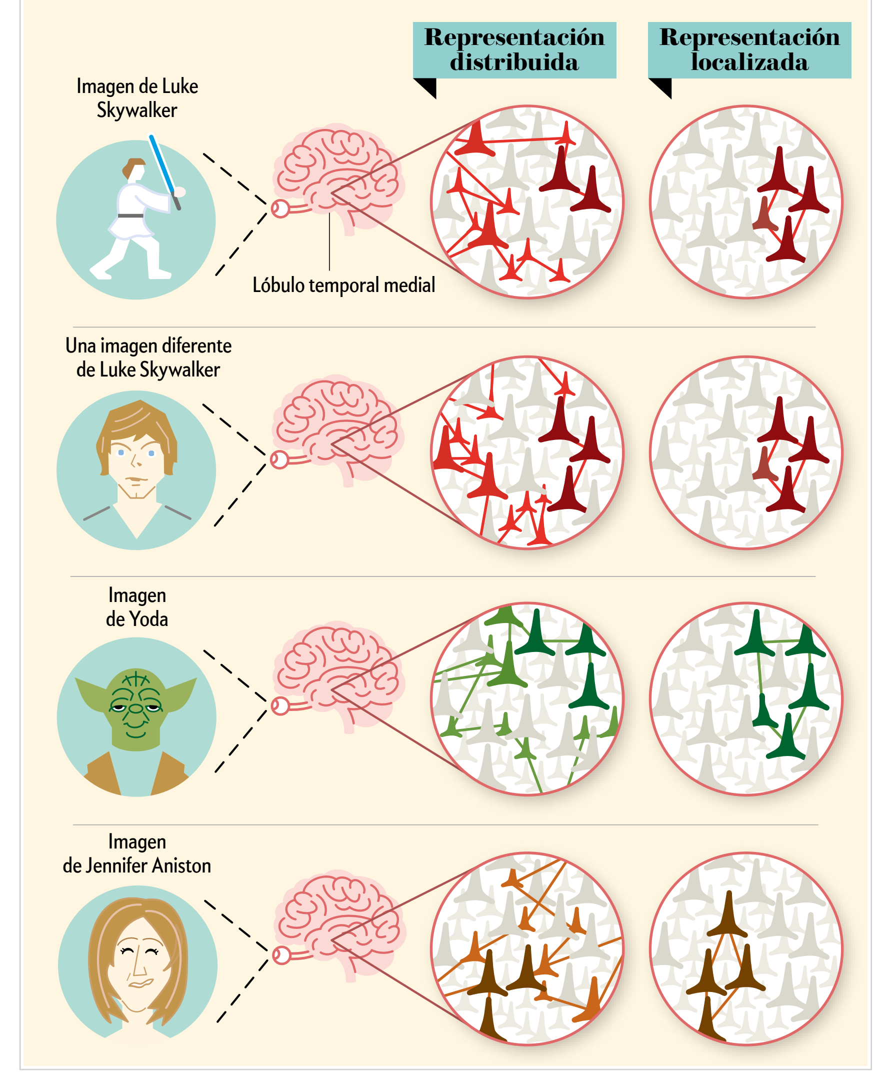
¿POR QUÉ CÉLULAS DE CONCEPTO?

Nuestras investigaciones tienen mucho que ver con la pregunta de cómo el cerebro interpreta el mundo exterior y traduce las percepciones en recuerdos. Pensemos en el famoso caso del paciente H.M., en 1953, que sufría una epilepsia intratable. En una estrategia desesperada para dete-

CÉLULAS DE CONCEPTO

Codificar un recuerdo

Los neurocientíficos debaten con fervor sobre dos teorías que explicarían la codificación de recuerdos en el cerebro. Una de ellas sostiene que la representación de un recuerdo (por ejemplo, la imagen de Skywalker) se almacena en retazos que se distribuyen a lo largo de millones e incluso miles de millones de neuronas. La otra, que ha ido ganando más credibilidad en los últimos años, mantiene que un número reducido de neuronas, unos miles o incluso menos, construyen una representación «localizada» de una imagen. Cada una de esas células se activará con la imagen de Luke, sea esta de cerca o de lejos. Algunas de ellas, pero no todas, también responderán ante una imagen asociada a Luke, como la de Yoda. Del mismo modo, otro grupo se activará ante Jennifer Aniston.



STEPHEN SAVAGE

ner los ataques, un neurocirujano extirpó su hipocampo y zonas adyacentes a ambos lados del cerebro. Tras la cirugía, H.M. podía reconocer todavía gente y objetos y recordar sucesos anteriores a la operación, pero el resultado inesperado fue que perdió para siempre la capacidad de crear recuerdos a largo plazo. Sin el hipocampo, cada cosa que le sucedía caía rápidamente en el olvido. La película *Memento* (año 2000) gira en torno a un personaje que padece un trastorno neurológico semejante.

El caso de H.M. demuestra que si bien el hipocampo, y el lóbulo temporal medial en general, no interviene en la percepción, sí resulta indispensable para que la memoria a corto plazo (lo que recordamos durante un corto período de tiempo) se convierta en memoria a largo plazo (lo que recordamos durante horas, días o años). En concordancia con esos hallazgos, sostenemos que las células de concepto, que se localizan en esas zonas, son fundamentales para trasformar aquello de lo que somos conscientes (motivado por percepciones sensoriales o por evocaciones internas) en recuerdos a largo plazo, que se almacenarán después en otras áreas de la corteza cerebral. No creemos que la neurona de Jennifer Aniston que descubrimos resultara necesaria para que el paciente reconociera a la actriz, sino para traerla al plano consciente y forjar nuevos vínculos y recuerdos relacionados con ella, como acordarse más tarde de haber visto una fotografía suya.

Nuestro cerebro utilizaría un número reducido de células de concepto para representar numerosas variaciones de una cosa como un concepto único (representación localizada e invariante). El funcionamiento de las células de concepto contribuye en gran medida a explicar el modo en que recordamos: evocamos a Jennifer y a Luke en todas sus formas, en lugar de rememorar cada poro de sus caras. No necesitamos (ni queremos) recordar todos los pormenores de lo que nos sucede.

Lo importante consiste en captar los elementos fundamentales de las situaciones concretas en las que intervienen personas y objetos relevantes para nosotros, en vez de recordar una abrumadora multitud de detalles insignificantes. Si en una cafetería coincidimos por casualidad con alguien que conocemos, resulta más útil recordar unos cuantos elementos llamativos de ese encuentro que la ropa exacta que llevaba esa persona, cada palabra que dijo o el aspecto de las otras personas presentes en la cafetería. Las células de concepto suelen activarse ante cosas personales significativas, ya que solemos recordar sucesos en los que intervienen personas o cosas familiares y no invertimos esfuerzo en crear recuerdos de objetos irrelevantes para nosotros.

Los recuerdos representan mucho más que conceptos individuales y aislados. Un recuerdo sobre Jennifer Aniston lleva implícito una serie de acontecimientos en los que ella (en realidad, el personaje de *Friends*) participa. La recuperación completa de un solo episodio de la memoria requiere conectar conceptos diferentes pero relacionados entre sí. De este modo, pensamos en Jennifer Aniston asociada al concepto de estar sentado en el sofá comiendo un helado y viendo *Friends*.

Si dos conceptos se hallan relacionados, algunas de las neuronas que codifican uno de ellos pueden activarse con el otro. Esa hipótesis ofrece una explicación fisiológica sobre el modo en el que las neuronas codifican asociaciones. La tendencia de las células a activarse ante conceptos relacionados puede suponer la base de la creación de la memoria episódica (como la secuencia concreta de acontecimientos del encuentro en la cafetería) o el flujo de la consciencia, en el que se pasa de manera espontánea de un concepto a otro. Vemos a Jennifer Aniston y esa percepción evoca el recuerdo de la televisión, el sofá y el helado (conceptos relacionados que subyacen al recuerdo de ver un capítulo de *Friends*). Un proceso semejante crearía también conexiones entre distintos aspectos del mismo concepto almacenados en diferentes áreas; quedarían así unidos el olor, la forma, el color y la textura de una rosa, o la apariencia de Jennifer y su voz.

Dadas las ventajas evidentes de almacenar los recuerdos de alto nivel como conceptos abstractos, cabe preguntarse también por qué la representación de estos en el lóbulo temporal medial debería realizarse en unas pocas células. Los estudios con modelos nos dan una respuesta: para crear asociaciones rápidas, hacen falta representaciones localizadas.

A pesar de la complejidad de los detalles técnicos, la idea general resulta bastante simple. Imaginemos una representación distribuida (lo contrario a localizada) de la persona que encontramos en la cafetería, con neuronas que codifican cada pequeño detalle de esa persona. Hagamos lo mismo con la cafetería. Realizar una conexión entre la persona y la cafetería exigiría crear vínculos entre los diferentes detalles que representan cada concepto pero sin mezclarlos con otros, porque la cafetería podría parecerse a una librería agradable y nuestro amigo a otra persona que conocemos.

La creación de tales conexiones en una red distribuida resulta muy lenta y lleva a la mezcla de recuerdos. Establecer esos vínculos en redes poco densas es, por el contrario, rápido y fácil. Solo requiere la creación de vínculos entre los grupos de células que representan cada concepto, mediante unas pocas neuronas que se activen ante ambos conceptos. Otra ventaja de la representación localizada radica en la posibilidad de incorporar elementos nuevos sin afectar profundamente el resto de la red. Tal separación resulta mucho más difícil en redes distribuidas, donde añadir un concepto nuevo altera el mapa de toda la red.

Las células de concepto conectan la percepción con la memoria; representan de manera abstracta y localizada el conocimiento semántico (la gente, los lugares, los objetos, todos los conceptos con significado que forman parte de nuestro mundo). Constituyen los elementos esenciales para la construcción de la memoria sobre los hechos y acontecimientos de nuestras vidas. Su elegante esquema de codificación permite a nuestras mentes dejar de lado incontables detalles sin importancia y extraer una noción que sirva para crear nuevas asociaciones y recuerdos. Codifican lo fundamental para retener nuestras experiencias.

Las células de concepto no se corresponden con las células de la abuela que Lettvin concibió, pero podrían constituir una importante base física de las habilidades cognitivas del ser humano, los componentes físicos del pensamiento y la memoria.

PARA SABER MÁS

Sparse but not «grandmother-cell» coding in the medial temporal lobe. R. Quian Quiroga, G. Kreiman, C. Koch y I. Fried en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 12, n.º 3, págs. 87-91, marzo de 2008.

Borges y la memoria. Un viaje por el cerebro humano, de «Funes el memorioso» a la neurona de Jennifer Aniston. R. Quian Quiroga, Sudamericana, 2012.

Percepts to recollections: Insights from single neuron recordings in the human brain. Nanthia Suthana y Itzhak Fried en *Trends in Cognitive Sciences*, vol. 16, n.º 8, págs. 427-436, 16 de julio de 2012.

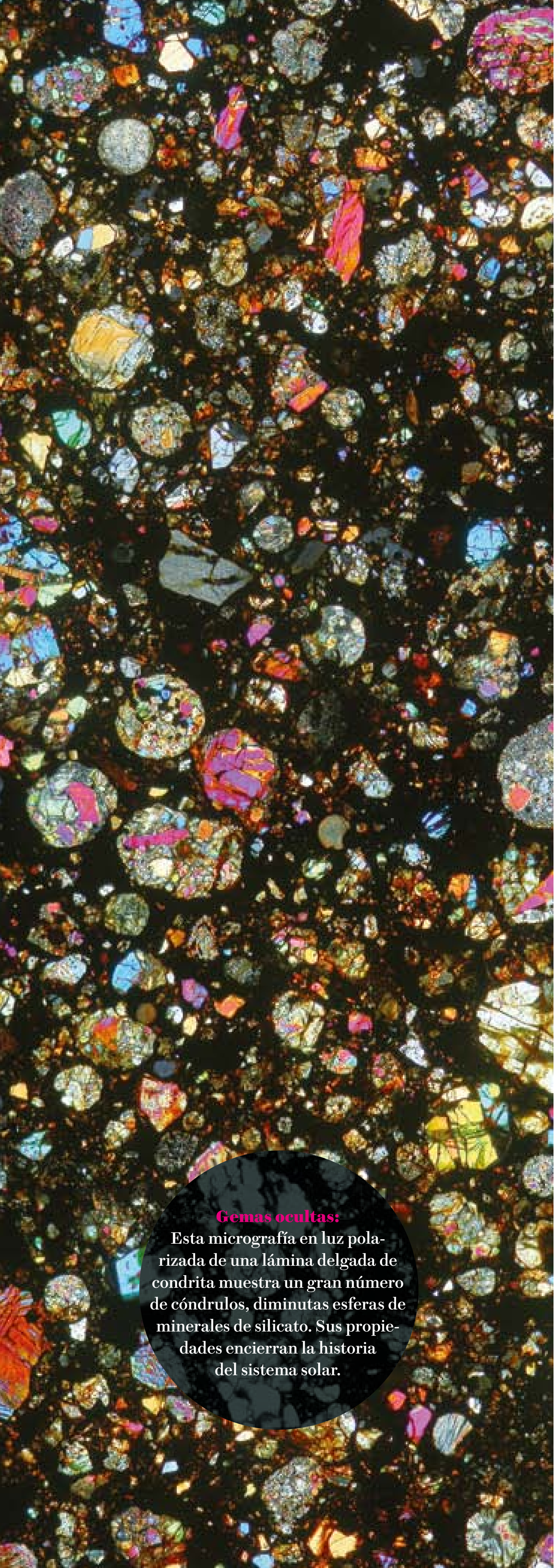
Concept cells: The building blocks of declarative memory functions. Rodrigo Quian Quiroga en *Nature Reviews Neuroscience*, vol. 13, págs. 587-597, agosto de 2012.



METEORITOS PRIMITIVOS

El análisis microscópico de las condritas, las rocas más antiguas del sistema solar, nos informa del aspecto que presentaba nuestro vecindario cósmico antes de que se formasen los planetas

Alan E. Rubin



Gemas ocultas: Esta micrografía en luz polarizada de una lámina delgada de condrita muestra un gran número de cóndrulos, diminutas esferas de minerales de silicato. Sus propiedades encierran la historia del sistema solar.

J. M. DEROCHETTE

Siento cierta compasión por los astrónomos. Solo pueden observar los objetos de su interés (estrellas, galaxias, cuásares) desde la distancia, en la pantalla de un ordenador o en forma de ondas de luz proyectadas por apáticos espectrógrafos. Sin embargo, quienes estudiamos planetas y asteroides podemos acariciar los fragmentos de nuestros cuerpos celestes más queridos. Durante mi licenciatura en astronomía pasé más de una noche de frío observando cúmulos estelares y nebulosas a través del telescopio. Y doy fe de que, desde un punto de vista emocional, sostener un fragmento de asteroide en las manos resulta mucho más reconfortante. Nos permite establecer un contacto real con unos objetos que, de otro modo, parecerían distantes y abstractos.

Los fragmentos de asteroide que más me atraen son las condritas. Estas rocas constituyen más del 80 por ciento de los meteoritos que caen desde el espacio. Deben su nombre a los cóndrulos que presenta la inmensa mayoría de ellas: diminutas esferas de material fundido que, a menudo, no superan el tamaño de un grano de arroz. Esos pequeños abalorios se formaron antes que los asteroides, en los estadios iniciales del sistema solar. Vistas al microscopio, las láminas delgadas de condritas presentan una gran belleza, no muy distinta de la que podemos apreciar en los cuadros de Wassily Kandinsky y otros artistas abstractos.

Las condritas son también las rocas más antiguas que los humanos hemos tocado jamás. Según las dataciones radioisotópicas, su origen se remonta a más de 4500 millones de años atrás; una época previa a la formación de los planetas, en la que el sistema solar no era más que el disco de gas turbulento que los astrónomos denominan nebulosa solar. La edad y composición de las condritas revela que constan de los mismos materiales primigenios que, tiempo después, se agregaron para formar planetas, satélites, asteroides y cometas.

Se cree que los cóndrulos se originaron a partir de grumos de polvo ricos en silicatos que, como consecuencia de episodios muy energéticos, se habrían fundido en pequeñas gotas. Después, estas se habrían solidificado y agregado entre sí —y también con polvo, metales y otros materiales— para formar condritas, las cuales continuaron creciendo hasta convertirse en asteroides. Con el tiempo, las violentas colisiones entre ellos los fragmentaron y algunos de esos pedazos acabaron cayendo sobre la Tierra en forma de meteoritos. Por ello, la atracción que siento por las condritas no se reduce a una mera cuestión estética: constituyen fósiles procedentes de los estadios iniciales del sistema solar, nuestra unión más firme con las condiciones bajo las cuales se originó nuestro planeta.

Pero, como bien saben los antropólogos, el descubrimiento de un fósil solo supone el primer paso hacia la reconstrucción de la historia. Todo hallazgo debe contextualizarse. Sin embargo, inferir el lugar de nacimiento de las diferentes condritas o sus ambientes de formación no resulta tarea sencilla.

La dificultad radica en la sorprendente escasez de datos precisos sobre la estructura de estas rocas tan diversificadas. Por esta razón, hace pocos años llevé a cabo un estudio sistemático de las propiedades físicas de las condritas. A partir de aquellos datos, pude esbozar un mapa aproximado de la antigua nebulosa en la que se formaron.

La distribución del polvo en el mapa que obtuve recordaba, a grandes rasgos, a la de un sistema estelar de tipo T Tauri. Estos astros presentan variaciones de luminosidad muy irregulares y se hallan envueltos por enormes atmósferas, por lo que los astrónomos creen que se trata de estrellas jóvenes que aún no han comenzado a quemar hidrógeno de manera estable. Muchas de ellas se encuentran rodeadas por discos de polvo. La semejanza entre la distribución de polvo de la nebulosa solar y la estructura de algunos sistemas T Tauri refuerza la hipótesis de que estos últimos son los progenitores de sistemas solares como el nuestro. Por tanto, las condritas no solo revelan nuestro pasado más remoto, sino que nos informan sobre la naturaleza de otros sistemas estelares jóvenes de la Vía Láctea. De igual modo, a medida que profundicemos en la física de tales sistemas, entenderemos mejor los procesos que condujeron a la formación de nuestros asteroides y planetas.

CARACTERÍSTICAS DE LAS CONDRITAS

Si deseamos reconstruir las características del sistema solar primigenio a partir de la información que nos proporcionan las condritas, deberemos en primer lugar compendiar las propiedades de estas rocas. Los expertos han establecido en torno a una docena de grupos básicos de condritas, atendiendo a cualidades como su composición química; su proporción de isótopos; la cantidad, tamaño y tipo de sus cóndrulos, o las dimensiones de la matriz compacta de polvo donde se alojan los cóndrulos y otros elementos. Dado que cada grupo de condritas presenta un conjunto distintivo de características físicas, químicas e isotópicas, los diferentes tipos que han caído en la Tierra deben de proceder de asteroides dispares.

Los investigadores han esbozado todo un abanico de modelos imaginativos para explicar el origen de cada grupo. En el proceso de formación de estas rocas influyen factores de todo tipo, como las turbulencias del gas, la presencia de campos magnéticos o la velocidad a la que las partículas penetraron en el plano medio de la nebulosa. A menudo, sin embargo, la conclusión final ha sido una encarnación muy vaga de la idea de que «distintos tipos de condritas se formaron bajo condiciones diferentes».

Con la esperanza de comprender mejor la naturaleza de tales condiciones, en 2009 comencé una revisión exhaustiva de los trabajos científicos publicados sobre el tema a fin de confeccionar una tabla que recogiera las propiedades esenciales de los principales grupos de condritas. Una vez terminada, traté de establecer correlaciones que pudieran esclarecer la historia de cada grupo. Sin embargo, me hallé a mí mismo ante una tabla medio vacía. Al parecer, no tantos investigadores se habían interesado en recopilar ese tipo de datos.

Alan E. Rubin es geoquímico experto en meteoritos de la Universidad de California en Los Ángeles. Ha escrito cerca de treinta artículos de divulgación sobre ciencias del espacio y es autor del libro *Disturbing the solar system* (Princenton Universtiy Press, 2002).



La única solución pasaba por ponerse manos a la obra, así que me atrincheré tras el microscopio y examiné 91 láminas delgadas de 53 meteoritos de tipos diversos. Cortados a un grosor de 30 micras, numerosos minerales se tornan transparentes, lo que permite estudiar sus propiedades ópticas. Las láminas delgadas revelan la existencia de un amplio surtido de cóndrulos que varían en tamaño, forma, textura y color. Analizar miles de cóndrulos constituye una labor tediosa, pero perseveré en aquel ejercicio de «astronomía microscópica» y, en un par de meses, completé la tabla. Aunque mis resultados no resolvieron por completo el misterio de las «condiciones diferentes», sí ampliaron y refinaron las hipótesis relativas a la región de la nebulosa solar en la que se originó cada grupo de condritas, así como sobre el aspecto que presentaban dichas zonas.

Comencemos por una clase poco habitual: las condritas de enstatita, las cuales apenas representan el 2 por ciento de todas las condritas caídas. Su nombre deriva del que suele ser su mineral más abundante (la enstatita, $MgSiO_3$) y se dividen en dos subtipos en función del contenido total de hierro: EH, si resulta elevado (la letra H corresponde a la inicial de la palabra inglesa *high*, «alto»), y EL, si es bajo (de la voz inglesa *low*, «bajo»). Hoy sabemos que la abundancia de determinados isótopos de nitrógeno, oxígeno, titanio, cromo y níquel en dichas condritas se asemeja a la de la Tierra o Marte. Por tanto, podemos interpretar que se formaron en la región interior a la órbita de Marte, mucho más cerca del Sol que otros grupos.

Un segundo tipo, el de las condritas ordinarias, se compone de tres subgrupos distintos pero muy relacionados, denominados H, L y LL, los cuales se diferencian por la cantidad de hierro que contienen y la forma en que este se presenta. El adjetivo «ordinario» hace referencia a su predominio, pues dan cuenta del 74 por ciento de los meteoritos caídos. Su notable abundancia nos indica que proceden de una región del sistema solar cuyas condiciones gravitatorias favorecen su caída hacia la Tierra.

John Wasson, de la Universidad de California en Los Ángeles, ha propuesto que las condritas ordinarias procederían de la región más próxima al Sol del cinturón de asteroides, el cual se extiende entre las órbitas de Marte y Júpiter. Los asteroides situados a 2,5 unidades astronómicas del Sol (2,5 veces la distancia que media entre el Sol y nuestro planeta) completan tres órbitas alrededor del Sol cada 12 años. En ese tiempo, Júpiter, situado a 5,2 unidades astronómicas, describe una vuelta completa. Esa resonancia orbital 3:1 provoca que los asteroi-

EN SÍNTESIS

Los meteoritos condríticos se componen del mismo material que dio lugar a los planetas, satélites, asteroides y cometas. Cada grupo de condritas presenta sus propias características, tanto en textura como en composición.

A partir de sus propiedades, el autor y otros investigadores han inferido la ubicación aproximada de la región en la que se formó cada grupo de condritas y la abundancia relativa de polvo en cada zona de la nebulosa solar.

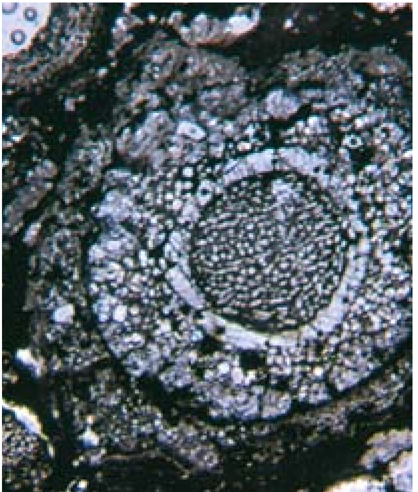
La distribución de polvo obtenida recuerda a la observada en los discos protoplanetarios de algunas estrellas de tipo T Tauri. Ello apuntaría a una semejanza entre dichos sistemas y los estadios iniciales del sistema solar.

des se vean sometidos de manera regular al enorme tirón gravitatorio de Júpiter, lo cual acaba arrastrando a muchos ellos hacia el interior del sistema solar. En Suecia se han hallado decenas de condritas ordinarias en rocas de 470 millones de años, lo que supone un indicio de que este tipo de condritas ha bombardeado la Tierra durante más del 10 por ciento de la historia de nuestro planeta, de 4500 millones de años de edad.

Un tercer grupo, el de las exóticas R, o Rumuruti (llamadas así por el lugar de Kenia donde se han recuperado los únicos meteoritos de esta clase), se asemeja a las condritas ordinarias en numerosos aspectos químicos. No obstante, contienen mucho más material en la matriz y presentan una proporción notablemente mayor del isótopo de oxígeno ^{17}O con respecto al más ligero, ^{16}O. Las temperaturas elevadas tienden a igualar las abundancias isotópicas; por tanto, cuanto mayor sea la distancia de un cuerpo al Sol, con mayor probabilidad se preservarán las variaciones en los isótopos de oxígeno. De esta manera, el desequilibrio entre isótopos nos estaría indicando que las condritas R se formaron en regiones más alejadas del Sol que las ordinarias.

Las altas temperaturas descomponen también los compuestos orgánicos, los cuales tienden a abundar en una clase variopinta de meteoritos conocidos como condritas carbonáceas. Por tanto, podemos concluir con casi total certeza que esta clase de condritas orbitaron aún más lejos del Sol que las condritas R. Las condritas carbonáceas se subdividen en seis grupos, a cada uno de los cuales se le puede asignar una posición nebular específica en función de sus propiedades químicas, isotópicas y estructurales.





Indicios de polvo: En algunas condritas, como las de tipo carbonáceo (*imagen superior*), los cóndrulos muestran un gran tamaño y complejidad (*micrografía*). Pueden contener un núcleo de silicato (*esfera central y anillo circundante*) envuelto por un manto secundario (*capa gruesa*) y una capa exterior, denominada borde ígneo (*zona irregular*). Los mantos y los bordes se generan a partir del polvo que, tras recubrir el cóndrulo, se funde en una etapa posterior. La presencia de mantos y bordes indica que el cóndrulo evolucionó en una región de la nebulosa solar rica en polvo.

MARK MAUTHNER, COLECCIÓN MACOVICH (*fotografía*); CORTESÍA DE ALAN E. RUBIN (*micrografía*)

INDICIOS DE POLVO

Si la composición química de las condritas nos informa sobre la región en la que se formaron, su estructura interna nos indica la abundancia de polvo en dicha zona. El polvo ha desempeñado una función clave en todas las etapas evolutivas del sistema solar. A medida que la nube primigenia de material colapsaba, las partículas de polvo adquirieron una mayor eficiencia de absorción de la luz infrarroja. El posterior aumento de temperatura en el centro de la nube derivó en la formación de una protoestrella. Más tarde, las partículas de polvo (y, a mayor distancia, de hielo) se concentraron en el plano medio de la nebulosa y coagularon, formando agregados más grandes que después se convertirían en planetesimales, cuerpos porosos cuyo tamaño oscila entre unos metros y decenas de kilómetros. Algunos de ellos se fundieron. Por último, los planetas se formaron a partir de varios planetesimales, fundidos o en estado sólido. En cuanto a los cometas y asteroides, lo más probable es que se originaran como resultado de un proceso de acreción de planetesimales en estado sólido y de composición más uniforme.

Un indicio de la abundancia de polvo en la zona de formación de cada tipo de condritas lo hallamos en la presencia de mantos ricos en polvo alrededor del núcleo silicatado de sus cóndrulos. Por lo general, los cóndrulos de ciertas condritas carbonáceas presentan un núcleo, o cóndrulo «primario», envuelto por un manto esférico de material fundido y de composición similar a la del cóndrulo primario. Con frecuencia, ese manto secundario se encuentra rodeado por un manto terciario, llamado borde ígneo, compuesto por granos de minerales de menor tamaño que los presentes en el núcleo central.

Numerosos expertos postulan que los mantos secundarios se formaron a partir de un cóndrulo original que, tras haberse solidificado tras la fusión inicial, adquirió un manto de polvo poroso. Después, el conjunto habría experimentado un segundo episodio de energía intermedia que fundió el manto, pero no el cóndrulo central. Por último, sucesos de menor energía, de menor duración, o ambos, dieron lugar al borde ígneo. En definitiva, podemos concluir que los grupos de condritas que presentan un gran número de cóndrulos con «mantos anidados» debieron formarse en ambientes polvorientos.

La alternancia de episodios de fusión y períodos en los que los cóndrulos habrían quedado cubiertos de polvo conllevaría la formación de cóndrulos mayores, con mantos secundarios más gruesos y bordes ígneos de mayor tamaño. Por tanto, tales rasgos nos estarían indicando que en el ambiente de formación de los cóndrulos existía una cantidad sustancial de polvo. Por otro lado, los cóndrulos envueltos en polvo se habrían enfriado más despacio que el resto, ya que el calor no habría podido escapar al exterior con tanta rapidez. Este enfriamiento más pausado habría facilitado la evaporación de los elementos volátiles, como el sodio o el azufre. A pesar de que la mayoría de los elementos volátiles se habrían condensado sobre el polvo circundante —e incorporado después a las condritas—, una fracción de ellos se habría perdido. En consecuencia, las condritas con grandes cóndrulos envueltos en polvo deberían de contener menos sodio y azufre que aquellas cuyos cóndrulos se formaron en ambientes pobres en polvo. Mis investigaciones demostraron que, en efecto, tal era el caso.

El sistema solar, antes de los planetas

Tras analizar las características químicas y estructurales de cuatro clases de condritas (*colores*) subdivididas en doce grupos, el autor ha refinado los modelos que intentan localizar la región del sistema solar en la que se originó cada variedad. Asimismo, ha inferido la cantidad relativa de polvo que presentaban dichas zonas antes de que se formasen los planetas (*mapa*). La mayor parte del polvo (*niebla blanquecina*) recubrió las condritas carbonáceas de tipo CR, CV y CK, que probablemente orbitaron a una distancia superior a tres

Futura órbita de Mercurio
Futuro Venus
Futura Tierra
Futuro Marte
1 UA (unidad astronómica)
2 UA
Condritas de enstatita

Condritas de enstatita (EH, EL)
RASGO DISTINTIVO: **Ricas en enstatita, un mineral de silicato.**
INDICADOR DE SU UBICACIÓN: **Las proporciones entre distintos isótopos son similares a las de la Tierra y Marte.**
INDICADOR DE POLVO: **Los cóndrulos suelen ser pequeños y solo unos pocos presentan mantos y bordes.**

Condritas ordinarias (H, L, LL)
RASGO DISTINTIVO: **Tipo de meteorito más común hallado en la Tierra.**
INDICADOR DE SU UBICACIÓN: **Su abundancia implica que las rocas proceden de una región en la que las interacciones con Júpiter las habrían arrojado con facilidad hacia nuestro planeta.**
INDICADOR DE POLVO: **En comparación con los grupos de enstatita, contienen un mayor número de cóndrulos con bordes; además, estos suelen ser más gruesos.**

A partir de la combinación de esos y otros datos relacionados con las supuestas ubicaciones de los asteroides progenitores, diseñé un mapa aproximado de la abundancia de polvo en el sistema solar primigenio. Los grupos de enstatita, que presumiblemente se habrían formado entre el Sol y la órbita de Marte, debieron originarse en una zona donde el polvo escaseaba, ya que contienen escasos cóndrulos con mantos o bordes y, en caso de presentar bordes, estos son delgados. Las condritas ordinarias y las de tipo R, las siguientes en orden de distancia al Sol, muestran más indicios de haberse generado en un ambiente con presencia de polvo. En ellas, la proporción de cóndrulos con bordes ígneos no solo resulta mayor, sino que los bordes se muestran más gruesos que en los grupos de enstatita.

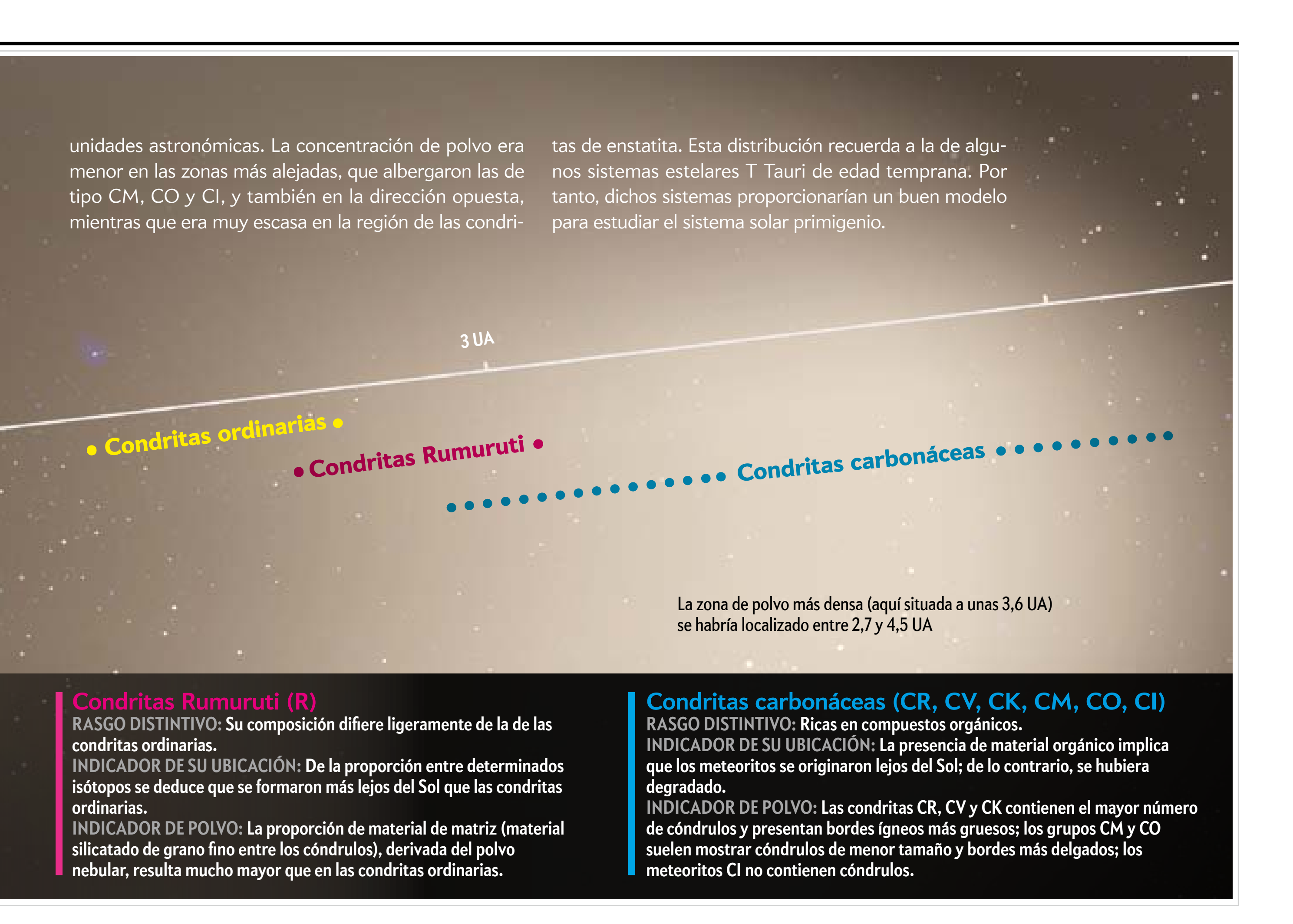
La concentración de polvo parece haber alcanzado un máximo en la región que ocuparon las condritas carbonáceas. Estas presentan los cóndrulos de mayor tamaño y, al mismo tiempo, el mayor número de cóndrulos envueltos por mantos secundarios y bordes ígneos (grupos conocidos como CR, CV y CK). Después, la abundancia de polvo habría disminuido al continuar hacia las regiones de formación de dos tipos de condritas carbonáceas (CM y CO), todavía más alejadas del Sol. (En estas últimas, los cóndrulos resultan mucho más pequeños y presentan menos mantos secundarios y bordes ígneos). La cantidad total de polvo continuaba decreciendo en las inmediaciones del grupo de condritas carbonáceas situadas a mayor distancia del Sol (CI), las cuales carecen por completo de cóndrulos. (No obstante, se siguen considerando condritas, ya que el criterio principal para clasificarlas como tales es que presenten una composición química similar a la de los elementos no volátiles del Sol).

Al observar la distribución del polvo en el mapa nebular, concluí que nuestro sistema solar primitivo debía asemejarse a buena parte de las estrellas de tipo T Tauri: astros jóvenes, semejantes al Sol primigenio y en los que todavía no ha comenzado la combustión estable de hidrógeno. El patrón de distribución de polvo recordaba al de diversos discos protoplanetarios observados alrededor de esta clase de estrellas. Puesto que la masa de sus discos (en torno al 2 por ciento de la masa del Sol) se aproxima a la masa inferida para la nebulosa solar, estas parecen proporcionar un buen modelo de la nebulosa que debió existir durante el período de formación de los cóndrulos y la acreción de las condritas.

DISCUSIÓN ACALORADA

Con todo, los mecanismos que originaron los cóndrulos constituyen objeto de debate. Lo primero que cualquier modelo de formación de cóndrulos debería explicar es el origen de los repetidos episodios de fusión. Tales procesos debieron haber actuado de forma generalizada, ya que de lo contrario no podrían observarse cóndrulos en casi todos los grupos de condritas. Por desgracia, aún carecemos de un modelo convincente que explique las propiedades de los cóndrulos. La fusión múltiple de un ingente número de cóndrulos nos permite descartar cualquie-

RON MILLER



ra de los fenómenos puntuales que se han propuesto, como el estallido de una supernova o una explosión de rayos gamma en el espacio profundo. Por un lado, la fuente de calor debe haber provocado la fusión de cóndrulos enteros (algunos de ellos, de varios milímetros de tamaño); por otro, debe haber sido capaz de fundir solo los finos mantos de polvo de otros cóndrulos y preservar intacto su interior. Algunos investigadores apoyan la existencia de una fuente de calor repetida y pulsante, como relámpagos, pero aún no se ha alcanzado un consenso respecto a esta posibilidad.

El modelo de formación de cóndrulos más aceptado entre los astrofísicos atribuye la fuente de calor a ondas de choque en el interior de la nebulosa, las cuales podrían haberse producido como consecuencia de la caída de material ajeno a la nebulosa. La propagación de las ondas de choque a través de las regiones nebulares polvorientas podría haber generado la cantidad de calor necesaria para fundir los cóndrulos. Sin embargo, los modelos basados en ondas de choque presentan sus propios inconvenientes. En primer lugar, nadie ha observado aún ondas de choque en discos protoplanetarios, por lo que su existencia no está probada. Además, tales choques habrían calentado un gran número de cóndrulos al mismo tiempo, pero no parece plausible que se limitasen a fundir la capa superficial de algunos de ellos (para formar mantos secundarios y bordes ígneos) mientras dejaban su interior relativamente frío. Un tercer inconveniente reside en que parece improbable que las ondas de choque, tratándose de fenómenos localizados, hayan originado cóndrulos en regiones nebulares muy distantes entre sí. En conclusión, el principal mecanismo de formación de cóndrulos continúa siendo un misterio.

Cincuenta años atrás, el experto en meteoritos John A. Wood escribió: «Solo en fecha reciente hemos comenzado a estudiar los cóndrulos como entidades. Contienen una información de gran valor [...] acerca de los procesos que han actuado sobre ellos. Su estudio tal vez nos permita profundizar en la naturaleza y evolución de la nebulosa solar, la formación de los planetas, ciertos estadios evolutivos del Sol y las escalas temporales de todos esos procesos». Medio siglo después aún nos queda mucho por aprender, pero la información portada por estos mensajeros primigenios del sistema solar ha comenzado a adquirir protagonismo.

PARA SABER MÁS

Chemical, mineralogical and isotopic properties of chondrules: Clues to their origin. R. H. Jones, J. N. Grossman y A. E. Rubin en *Chondrites and the protoplanetary disk*, dirigido por A. N. Krot, E. R. D. Scott y B. Reipurth. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, vol. 341, págs. 251-285, 2005.

Physical properties of chondrules in different chondrite groups: Implications for multiple melting events in dusty environments. Alan E. Rubin en *Geochimica et Cosmochimica Acta*, vol. 74, n.º 16, págs. 4807-4828, 15 de agosto de 2010.

Meteorite or Meteorwrong? Departamento de ciencias de la Tierra, Universidad de Washington en St. Louis: **meteorites.wustl.edu/id/ordinary_chondrites.htm**



EVOLUCIÓN HUMANA

UNA HISTORIA

Nuevos descubrimientos de fósiles complican aún más la identificación de nues



INTRINCADA

tros antepasados más remotos

Katherine Harmon

Piezas sueltas: El esqueleto fragmentado de *Ardipithecus ramidus* ha reabierto ideas sobre los primeros humanos.

DE LEJOS, TAL VEZ LA HABRÍAMOS CONFUNDIDO CON un humano. Aunque solo alcanzaba un metro de estatura y tenía brazos largos y una cabeza pequeña, caminaba con dos piernas. Quizá con poca elegancia, pero se desplazaba como lo hacemos nosotros y de modo diferente al resto de los mamíferos vivos. Ese extraño pariente nuestro era Lucy, un miembro de la especie *Australopithecus afarensis*, que vivió hace unos 3,2 millones de años. Se la considera una de las especies más antiguas en la línea evolutiva que dio lugar a la nuestra, *Homo sapiens*.

Cuando Lucy fue descubierta, en 1974, los indicios sobre su locomoción bípeda le garantizaban un lugar en el árbol genealógico humano. Aunque había pruebas de la coexistencia posterior de diferentes líneas evolutivas, los primeros episodios de la evolución humana parecían bastante simples. Se pensó, por tanto, que Lucy y otros antepasados bípedos descubiertos más tarde pertenecían a un único linaje. Los hallazgos hacían suponer que la evolución humana se había producido como un progreso unilineal en el que se pasó de una locomoción sobre los nudillos (*knuckle-walking*), semejante a la del chimpancé, a nuestra locomoción erguida. Tal hipótesis se impuso en la paleoantropología a lo largo del siglo pasado. Pero a medida que se ha indagado en tiempos más remotos, se ha puesto de manifiesto que nuestros orígenes resultan más complejos de lo que sugería esa icónica imagen.

Dos descubrimientos recientes han hecho añicos la noción que se tenía sobre el origen de los humanos: el primero corresponde a un esqueleto completo de hace 4,4 millones de años; el segundo, a los escasos restos fósiles de un pie de 3,4 millones de años. Los fósiles recién descritos indican que nuestro árbol evolutivo resulta intrincado y que nuestra forma singular de locomoción bípeda habría aparecido en más de una ocasión y no siempre de la misma manera, incluso en especies que no fueron antepasadas directas nuestras. Debido a esos hallazgos, los expertos están reconsiderando qué rasgos permiten reconocer a una especie como ascendiente nuestra, qué recorrido siguió la evolución humana y si existe alguna forma de identificar con fiabilidad el último antepasado común de humanos y chimpancés.

Según Carol W. Ward, de la facultad de medicina de la Universidad de Missouri, a medida que vamos disponiendo de más fósiles nos vamos dando cuenta de las numerosas ramificaciones del árbol evolutivo. Los restos están revelando también que la línea humana no fue la única en experimentar adaptaciones extraordinarias durante los últimos millones de años. En el linaje de los chimpancés se han producido, asimismo, cambios considerables en ese período, con una alta especialización en el desplazamiento por los árboles. Este hecho podría derribar la idea de que los chimpancés actuales constituyen un buen modelo para conocer a nuestros primeros antepasados. Según Ward, los nuevos datos nos aportan una imagen totalmente distinta de nuestros orígenes.

PEQUEÑOS HOMININOS, GRANDES CAMBIOS

La mayor sacudida a la imagen que representaba la evolución desde un chimpancé encorvado hasta *Homo* procede de un ser denominado Ardi. La descripción del importante esqueleto de *Ardipithecus ramidus*, de 4,4 millones de años de antigüedad, en una serie de artículos publicados en 2009 ha llevado a la paleoantropología a entrar en barrena. Descubierto en el yacimiento de Aramis, en la región etíope de Afar, Ardi cumple con las características esperadas en un hominino de esa cronología (los homininos son primates que se hallan más emparentados con nosotros que los chimpancés, nuestros parientes vivos más próximos). Numerosos paleoantropólogos pronosticaban que

EN SÍNTESIS

Los paleoantropólogos han sostenido durante mucho tiempo que los humanos descendemos de un antepasado con apariencia de chimpancé y que los primeros fósiles humanos pertenecían a una misma línea evolutiva. Según esta idea, solo más tarde aparecieron en nuestro árbol múltiples ramas evolutivas imbricadas, entre ellas nuestra especie, la única que sobrevivió hasta la actualidad.

Hallazgos recientes de fósiles han dado un vuelco a esa perspectiva, al aportar pruebas de que el último antepasado común de humanos y chimpancés no se asemejaría a estos últimos y de que nuestros primeros ancestros no estaban solos en África.

Los fósiles están obligando a reconsiderar los rasgos que permiten reconocer si una especie pertenece a la línea evolutiva que dio lugar a la especie humana; también hacen cuestionar si se podrá algún día identificar ese último antepasado común.

DAVID BRILL (*páginas anteriores*)



Un pie diferente: Los escasos restos fósiles del pie del yacimiento de Burtele, en Etiopía, revelan un dedo gordo divergente (*izquierda*) y otros rasgos que lo distinguen del pie de los humanos actuales (*derecha*) y de sus antecesores. Ello indica que una segunda línea evolutiva de bípedos pudo coexistir con nuestro probable antepasado *Australopithecus afarensis*.

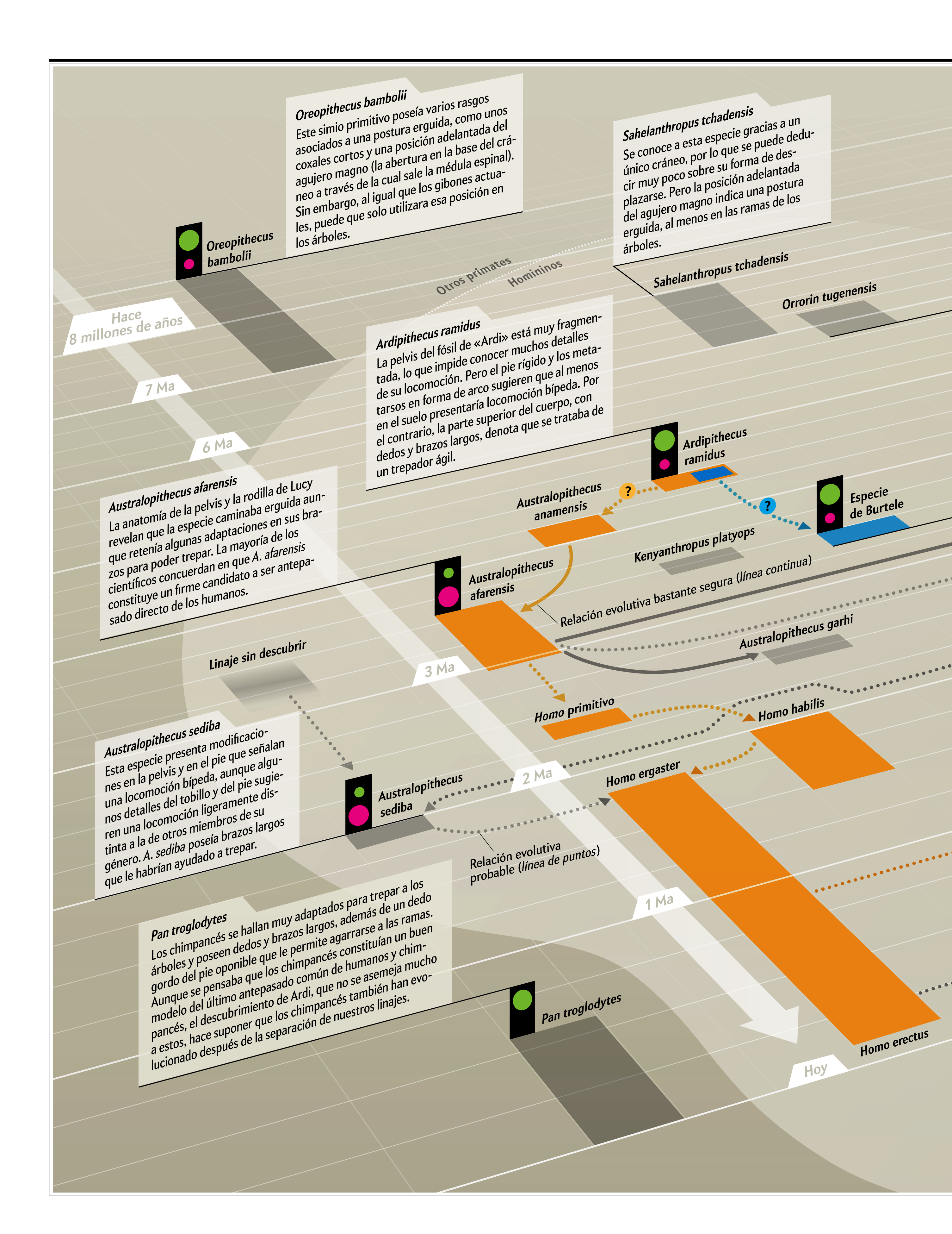
LISA DEJONG, LANDOV

un hominino de esa antigüedad tendría muchos de los rasgos que observamos en los chimpancés y otros simios actuales de África. Poseerían unos caninos de gran tamaño propios de un sistema social basado en la agresión, brazos y dedos muy largos para trepar a los árboles y adaptaciones en la muñeca para desplazarse sobre los nudillos.

En cambio, Tim D. White, de la Universidad de California en Berkeley, director del equipo que descubrió a Ardi, describe el pequeño *A. ramidus* como un organismo dispar con características de homininos posteriores y de simios más antiguos, pero con escasos rasgos de los chimpancés. Igual que los humanos, Ardi cuenta con dientes caninos de tamaño reducido, lo que indicaría un cambio de un sistema social dominado por los machos hacia un sistema más cooperativo, con la presencia de parejas monógamas estables y duraderas. Además, a diferencia de los grandes simios africanos actuales, la capacidad del movimiento de extensión en la muñeca de Ardi hace pensar que, cuando caminaba a cuatro patas, lo hacía apoyando las palmas y no los nudillos. Por otro lado, presentaba dedos largos y curvados que le ayudarían a trepar por los árboles, aunque sus muñecas y manos no se hallaban adaptadas para suspenderse de las ramas del modo en que lo hacen los chimpancés.

Las extremidades inferiores de Ardi muestran también la misma combinación de rasgos humanos y de simio primitivo. Mientras su pie relativamente plano y el dedo gordo divergente le servirían para desplazarse por los árboles, la rigidez del pie y la escasa capacidad de los otros dedos para doblarse hacia atrás le facilitarían la locomoción bípeda. Debido a que la pelvis se hallaba muy fragmentada, desconocemos algunos detalles sobre el movimiento de sus piernas. Pero William Jungers, de la Universidad de Stony Brook, afirma que la corta distancia existente entre el coxal y el sacro (un hueso triangular en la base de la espina dorsal) se asemeja a la de los humanos actuales y otros homininos de locomoción bípeda. Además, en Ardi el agujero magno (la abertura en la base del cráneo por donde sale la médula espinal) ocupa una posición adelantada, lo que muchos consideran un indicio de que el primate adoptaría en el suelo una postura erguida y bípeda. Sin embargo, otros apuntan que quizá se pondría de pie solo a ratos, por ejemplo, cuando necesitaba sujetar algo con las manos.

Con su asombrosa mezcla de rasgos anatómicos, Ardi ha hecho reconsiderar la definición de hominino. Tradicionalmente el término llevaba implícito el bipedismo. Pero en Ardi ese rasgo no excluye la capacidad para trepar. Incluso los humanos actuales poseemos una gran flexibilidad de locomoción. Quizá no estemos tan bien equipados para suspendernos de rama en rama como hacen los chimpancés y otros simios; pero, aun así, numerosas culturas indígenas siguen sirviéndose de esa táctica para obtener alimentos. Incluso, la especie de Lucy, *A. afarensis*, con un bipedismo claro, poseía brazos relativamente largos, lo que sugiere que en ocasiones trepaba a los árboles. Un análisis



Oreopithecus bambolii
Este simio primitivo poseía varios rasgos asociados a una postura erguida, como unos coxales cortos y una posición adelantada del agujero magno (la abertura en la base del cráneo a través de la cual sale la médula espinal). Sin embargo, al igual que los gibones actuales, puede que solo utilizara esa posición en los árboles.
Oreopithecus bambolii
Sahelanthropus tchadensis
Se conoce a esta especie gracias a un único cráneo, por lo que se puede deducir muy poco sobre su forma de desplazarse. Pero la posición adelantada del agujero magno indica una postura erguida, al menos en las ramas de los árboles.
Sahelanthropus tchadensis
Orrorin tugenensis
Otros primates
Homininos
Hace 8 millones de años
7 Ma
6 Ma
Ardipithecus ramidus
La pelvis del fósil de «Ardi» está muy fragmentada, lo que impide conocer muchos detalles de su locomoción. Pero el pie rígido y los metatarsos en forma de arco sugieren que al menos en el suelo presentaría locomoción bípeda. Por el contrario, la parte superior del cuerpo, con dedos y brazos largos, denota que se trataba de un trepador ágil.
Ardipithecus ramidus
Australopithecus anamensis
?
?
Especie de Burtele
Kenyanthropus platyops
Australopithecus afarensis
La anatomía de la pelvis y la rodilla de Lucy revelan que la especie caminaba erguida aunque retenía algunas adaptaciones en sus brazos para poder trepar. La mayoría de los científicos concuerdan en que A. afarensis constituye un firme candidato a ser antepasado directo de los humanos.
Australopithecus afarensis
Relación evolutiva bastante segura (línea continua)
Australopithecus garhi
Linaje sin descubrir
3 Ma
Homo primitivo
Homo habilis
Australopithecus sediba
Esta especie presenta modificaciones en la pelvis y en el pie que señalan una locomoción bípeda, aunque algunos detalles del tobillo y del pie sugieren una locomoción ligeramente distinta a la de otros miembros de su género. A. sediba poseía brazos largos que le habrían ayudado a trepar.
Australopithecus sediba
2 Ma
Homo ergaster
Relación evolutiva probable (línea de puntos)
1 Ma
Pan troglodytes
Los chimpancés se hallan muy adaptados para trepar a los árboles y poseen dedos y brazos largos, además de un dedo gordo del pie oponible que le permite agarrarse a las ramas. Aunque se pensaba que los chimpancés constituían un buen modelo del último antepasado común de humanos y chimpancés, el descubrimiento de Ardi, que no se asemeja mucho a estos, hace suponer que los chimpancés también han evolucionado después de la separación de nuestros linajes.
Pan troglodytes
Hoy
Homo erectus

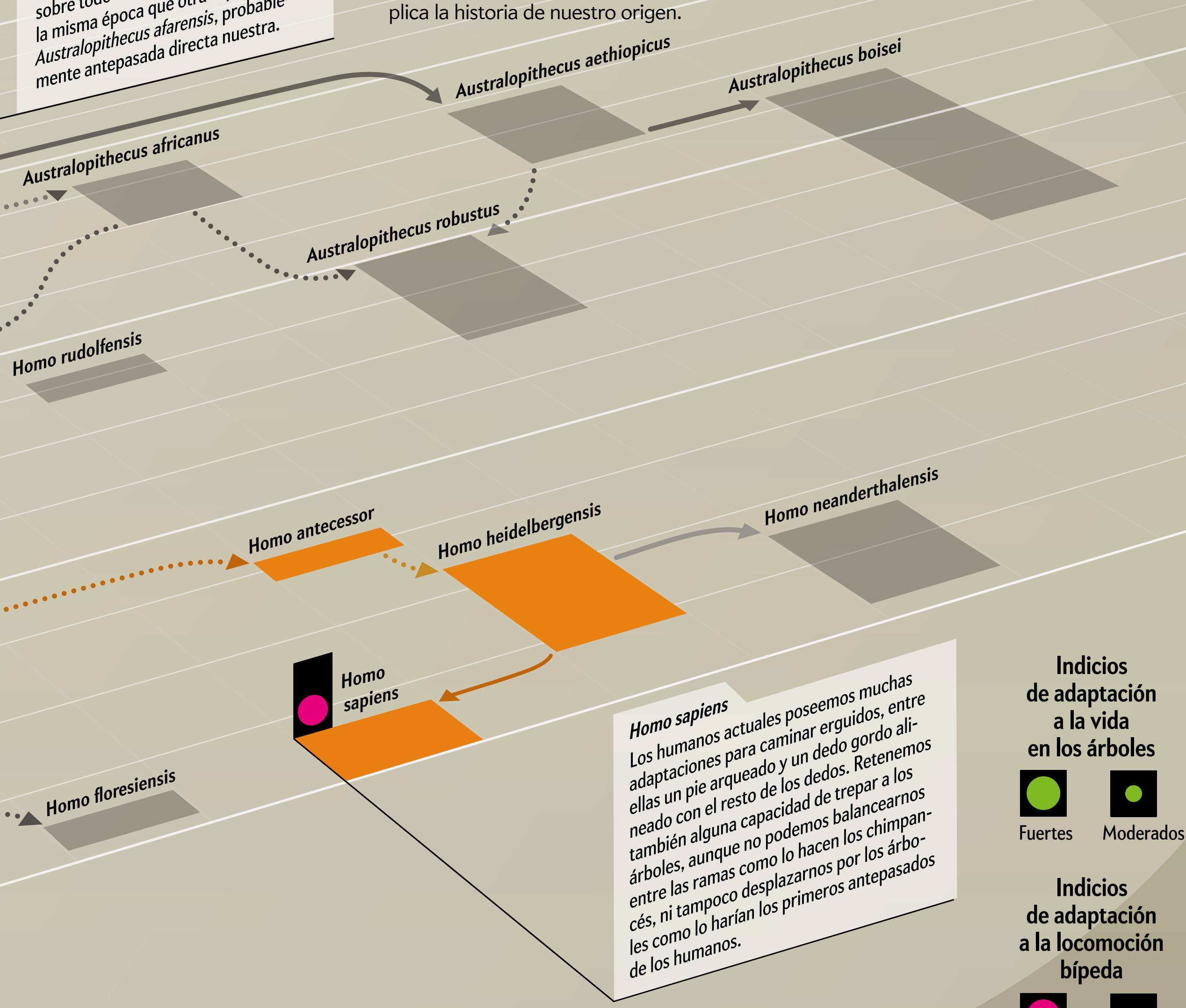
Nuestro enmarañado árbol evolutivo

Durante mucho tiempo, la evolución de *Homo sapiens* fue representada como una simple trayectoria de escalones evolutivos que partía de un simio primitivo similar a un chimpancé. A través de una serie de protohumanos intermedios, este daba lugar a los humanos erguidos y bípedos. Con cada paso, los rasgos se transformaban en una sola dirección: los dedos se acortaban, el dedo gordo del pie se alineaba con el resto de los dedos y la cabeza se adelantaba hasta situarse en la vertical de nuestra columna. Sin embargo, una serie de hallazgos recientes han demostrado que tal representación resulta errónea. Durante la evolución han aparecido dedos de diferentes longitudes, el dedo gordo del pie oponible (para trepar a los árboles) coexistió con el dedo gordo alineado al resto de los dedos (una adaptación para desplazarse de pie), e incluso algunos simios primitivos presentaban adaptaciones para caminar de forma bípeda.

Esta mezcla de rasgos fósiles demuestra que la evolución resulta mucho más compleja y que en nuestros orígenes aparecieron varias líneas paralelas (*señaladas en naranja y azul*), igual que sucedió en períodos posteriores. De esta forma, averiguar a qué especie pertenece un fósil y distinguir las líneas ancestrales de las ramificaciones extintas representará una tarea más ardua de lo que parecía. La ilustración muestra cómo la distribución de algunos rasgos clave relacionados con la locomoción en simios actuales y fósiles y en los parientes de los humanos complica la historia de nuestro origen.

Orrorin tugenensis
Pocos fósiles nos permiten conocer esta especie. Pero algunos de los huesos, como el fémur, indican que pudo estar adaptada en parte a caminar erguida. Sin embargo, las fuertes inserciones musculares del brazo y las falanges curvadas también hacían de él un buen trepador.

La especie de Burtele
Aunque solo se han descrito ocho fósiles de ella, se piensa que representa una nueva especie de hominino. Era sobre todo arborícola, aunque vivió en la misma época que otra especie bípeda, *Australopithecus afarensis*, probablemente antepasada directa nuestra.



JEN CHRISTIANSEN

«Lo que vislumbramos en el registro fósil representa una ínfima parte de la diversidad del pasado.»

—Carol V. Ward, facultad de medicina de la Universidad de Missouri

reciente de los fósiles de un individuo infantil de *A. afarensis*, hallado en el año 2000 en Dikika (Etiopía), indican una semejanza entre los hombros de esta especie y los de los simios, lo que convertiría al primate en un trepador eficaz. De este modo, Lucy, Ardi y otras especies anteriores habrían disfrutado de lo mejor de ambos medios, apunta Jungers.

White y sus colaboradores han propuesto que *A. ramidus* representaría un posible antepasado de *A. afarensis* y, por consiguiente, un ascendiente directo de *H. sapiens*. Sin embargo, la antigüedad de Ardi y otros detalles de su anatomía hacen pensar que no pertenecía a nuestro linaje. David Begun, de la Universidad de Toronto, opina que sería uno de los primeros homininos que se separó en una línea propia. Ardi vivió apenas 200.000 años antes de que apareciera otra especie con un bipedismo más desarrollado, *Australopithecus anamensis*, a la que muchos expertos consideran antepasada de *A. afarensis*. Quizá se produjera una evolución rápida desde *A. ramidus* hacia *A. anamesis* (y a su vez hacia *A. afarensis*), pero numerosos científicos, entre los que figura Begun, opinan que más probablemente esas especies no pertenecen a una única línea evolutiva, sino a dos o más. Según él, *A. ramidus* habría formado una línea lateral. Otros también han cuestionado la posición evolutiva de Lucy como ascendiente directa nuestra. Tal y como destaca Yohannes Haile-Selassie, del Museo de Historia Natural de Cleveland, que contribuyó en el estudio de Ardi de 2009, la escasez de fósiles de homininos en el período que abarca desde los últimos *A. afarensis* hasta la aparición de los primeros *Homo* deja esta pregunta sin respuesta.

La particular mezcla de rasgos en Ardi (con muñecas que permitían apoyar la palma de la mano, falanges de los pies con capacidad para doblarse hacia atrás y unos caninos pequeños) ha causado cierta consternación sobre la posición que ocupa en nuestro árbol genealógico. Pero sus restos aportan un punto de vista importante sobre los orígenes humanos precisamente porque no se parece a un chimpancé y tampoco encaja con el concepto tradicional que se tenía de un hominino. Si Ardi fuera un hominino primitivo en el linaje que dio lugar a los humanos, entonces nuestro último antepasado común no se asemejaba mucho a un chimpancé actual. Pero si representara un linaje de hominino distinto o correspondiera a un simio extinto, entonces la locomoción bípeda no constituiría un rasgo exclusivo de nuestra línea evolutiva. De una forma u otra, la visión que se tiene sobre la evolución humana cambia por completo.

COMPAÑÍA PARA LUCY

Antes de que pudieran asimilarse las implicaciones que entrañaba Ardi, surgió un nuevo misterio anatómico en el yacimiento de Burtele, también en la región de Afar, en el centro de Etiopía. El hallazgo fue publicado en 2012 y consistía en ocho pequeños huesos del pie. Un número exiguo para describir una nueva especie, pero suficiente para afirmar con contundencia que no se asemejaban a ningún otro hallazgo previo. Los fósiles reforzaron la idea de que la evolución de los homininos resultaba aún más compleja de lo que Ardi dejaba entrever.

Aunque se dispone de pocos huesos del espécimen de Burtele, Jungers afirma que corresponde sin duda a un hominino, sobre todo, por la apariencia del dedo gordo. Pero el pie de ese hominino es mucho más arcaico que el de una especie plenamente bípeda como la de Lucy. De hecho, se parece al pie de Ardi en que ambos presentan un dedo gordo prensil separado del resto de los dedos, lo que indica una locomoción al menos en parte arbórea. Esa característica no desentonaría si la antigüedad de Burtele se aproximara a la de Ardi, pero no es así. El pie data de hace 3,4 millones de años, es decir, es contemporáneo de *A. afarensis*, que habitó la misma región hace entre 2,9 y 3,6 millones de años.

Igual que Ardi, el individuo de Burtele tal vez apoyara la parte lateral del pie cuando caminaba erguido sin utilizar el dedo gordo para impulsarse hacia delante, como lo hacemos nosotros. Ninguna de esas especies había desarrollado adaptaciones óptimas para el bipedismo y ambas todavía podían agarrarse de las ramas con los pies. Jeremy DeSilva, de la Universidad de Boston, destaca que al no haber hallado en Burtele el primer cuneiforme, uno de los huesos del tarso, resulta difícil saber el grado de desviación del dedo gordo. También habría ayudado disponer de la pelvis o el cráneo, para situar el espécimen en la complicada historia evolutiva de la locomoción.

El fósil de Burtele podría corresponder a un descendiente de la especie de *A. ramidus* y pertenecer a una línea evolutiva lateral que convivió durante mucho tiempo con nuestro linaje. «Podemos imaginarnos a Lucy mirando hacia los árboles y viendo a esos seres», comenta Bruce Latimer, de la Universidad de la Reserva Case Western. De hecho, el yacimiento de Burtele dista tan solo 48 kilómetros del lugar donde fue descubierta Lucy. El hallazgo de un fósil que se ha descartado como ascendiente directo nuestro reviste también una enorme importancia. Nos da una perspectiva mucho más realista de nuestro pasado, afirma Ward. Podemos aprender tanto de una especie hermana como de una antepasada directa nuestra, porque podemos identificar las opciones que no siguieron nuestros ancestros.

MÁS PIEZAS DEL ROMPECABEZAS

El pie de Burtele pone de relieve que nuestro estatus de único hominino superviviente (los neandertales se extinguieron hace 28.000 años y *Homo floresiensis*, apodado hobbit, desapareció hace unos 17.000 años) constituye un hecho excepcional dentro de la evolución de los homininos. Igual que en episodios más recientes de nuestra evolución hallamos múltiples linajes de homininos coetáneos, también durante el resto de nuestra historia hubo diferentes líneas evolutivas solapadas en el tiempo. Ahora que sabemos que dos homininos muy diferentes (el espécimen de Burtele y Lucy) vivieron en la misma época, será necesario reexaminar todos los fósiles de homininos, antiguos y nuevos, para determinar a qué especie pertenecen; ya no bastará realizar la datación del fósil para atribuirlo al hominino dominante de esa época. Para DeSilva ello significa «tesis y toneladas de trabajos». Lo que considera un reto fascinante, en vez de un inconveniente.

Poco a poco los científicos van aprendiendo que ese tipo de hallazgos no deberían sorprender tanto. Ward afirma que ante un descubrimiento como el pie de Burtele, claramente distinto al de *A. afarensis*, más bien deberíamos exclamar: «¡Por supuesto!». Durante el Mioceno, hace entre 5 y 23 millones de años, vivieron en todo el mundo centenares de especies de grandes simios. Según Ward, pensar que esa diversidad desapareció de repente resultaría absurdo. «Lo que vislumbramos en el registro fósil representa una ínfima parte de la diversidad del pasado», añade. Por desgracia, la variedad hace más difícil la identificación de nuestros ancestros directos y del último antepasado común de humanos y chimpancés. Para complicar aún más la tarea, se dispone de un registro fósil muy pobre de los chimpancés y otros simios africanos.

¿Podrán algún día inferirse las relaciones evolutivas con suficiente precisión para construir nuestro árbol genealógico? Probablemente no, al menos a corto plazo. En un artículo publicado en *Nature* en 2011, dos paleoantropólogos sostenían que ese propósito estaría condenado al fracaso debido a la homoplasia, esto es, la aparición independiente de caracteres similares en diferentes especies. Ello significa que la presencia de un rasgo común, como el bipedismo, en especies separadas por millones de años no permite asegurar que una de ellas descienda directamente de la otra. «Los rasgos compartidos pueden llevarle a uno demasiado lejos a la hora de establecer las relaciones evolutivas», remarca Terry Harrison, del Centro para el Estudio del Origen Humano de la Universidad de Nueva York, autor del artículo junto con Bernard Wood, de la Universidad George Washington. Por ejemplo, *Oreopithecus bambolii*, un simio extinto que vivió en Italia hace entre 7 y 9 millones de años poseía caninos pequeños en comparación con otros simios del Mioceno, una cara poco proyectada, un agujero magno en posición anterior y huesos coxales cortos y anchos, rasgos que se hallan asociados a los homininos. Sin embargo, se supone que la especie correspondía a un gran simio y no a un hominino arcaico. En parte debido a su diferente forma de locomoción (confinada a los árboles, igual que los gibones), además de algunas características de sus pies, dedos y brazos, adaptados a la vez a trepar y a balancearse por las ramas.

El pie de Burtele proporciona más pruebas de la existencia de homoplasia en la locomoción bípeda. Igual que se observan múltiples formas de trepar o de locomoción cuadrúpeda, ¿por qué no puede haber diferentes versiones de bipedismo?, se pregunta DeSilva. La evolución es ingeniosa y ofrece soluciones a los problemas una y otra vez. Reconoce haberse mostrado crítico con las hipótesis que defendían un tipo de locomoción bípeda diferente en una especie recién descubierta, *Australopithecus sediba*. Este fósil de casi dos millones de años de antigüedad, hallado en Sudáfrica, presentaba rasgos anatómicos singulares en el talón, el tobillo, la parte media del pie y la rodilla [*véase* «El origen del género *Homo*», por K. Wong; Investigación y Ciencia, junio de 2012]. En un principio, DeSilva pensó que esas diferencias anatómicas no darían lugar a una locomoción muy distinta a la variada forma de caminar que se observa en los humanos actuales. Pero los fósiles de Burtele han contribuido a cambiar su opinión. Ningún otro hueso se parece a ellos, lo que le lleva a concluir que debieron de existir diferentes estrategias, distintas formas de desplazarse.

Mas tal conclusión resulta incómoda. Latimer dice que «todos queremos pensar que los humanos somos especiales». Pero si Ardi y otros homininos arcaicos poseían tan pocos rasgos de los chimpancés, y si se tiene en cuenta que los chimpancés están muy derivados morfológicamente, entonces nuestro último antepasado común debería de asemejarse poco a ellos. De hecho, puede que tuviera un aspecto similar al de otros homininos. El investigador apunta que ese antepasado habría presentado dedos cortos, como los de *A. ramidus* y *A. afarensis*. Quizá contara también con un cerebro más reducido que el de un chimpancé. Como afirma Jungers, los chimpancés parecen poseer un cerebro más grande que algunos de los primeros homininos.

El interés por reconstruir el aspecto del último antepasado común y el modo en que se desplazaba sin duda se intensificará. Si durante el pasado decenio los paleoantropólogos han aprendido algo, ello es que las ramificaciones de los antepasados humanos van a enmarañarse todavía más, especialmente conforme vayamos retrocediendo en el tiempo.

ATOLLADERO DE ANCESTROS

Como señala DeSilva, para hacer las cosas aún más confusas, el último antepasado común no concordará con un único individuo. Se tratará de una población, y esta tendrá parientes que a su vez tendrán otros parientes. Va a resultar muy difícil saber si hemos hallado ese ascendiente sin disponer de su ADN.

Los avances en los análisis genéticos de humanos y chimpancés actuales han permitido estimar la antigüedad del último antepasado común. Pero la horquilla temporal, hace entre 6 y 10 millones de años, sigue siendo muy grande y la secuenciación genética por sí sola no permite conocer el aspecto de esa criatura. Los últimos estudios han empezado a precisar los ritmos de mutación, lo que ayudará a establecer la cronología y acotará la búsqueda de fósiles de nuestro antepasado en depósitos geológicos de una edad determinada. Y si comparamos las pruebas fósiles con los análisis genéticos, tal vez identifiquemos los cambios que empezaron a producirse en nuestro genoma cuando se separaron las líneas evolutivas de chimpancés y humanos.

Pero sin contar con el genoma de estos homininos arcaicos, va a resultar muy complicado situarlos en algún lugar del intrincado árbol genealógico. Sobre todo, porque esas especies se hallaban más emparentadas con nosotros que cualquier otro ser vivo actual, explica DeSilva. Por este motivo, determinar el significado evolutivo de un pequeño cambio en la forma de un hueso del pie en las especies representadas en el registro fósil ha revestido dificultad y ha generado debate.

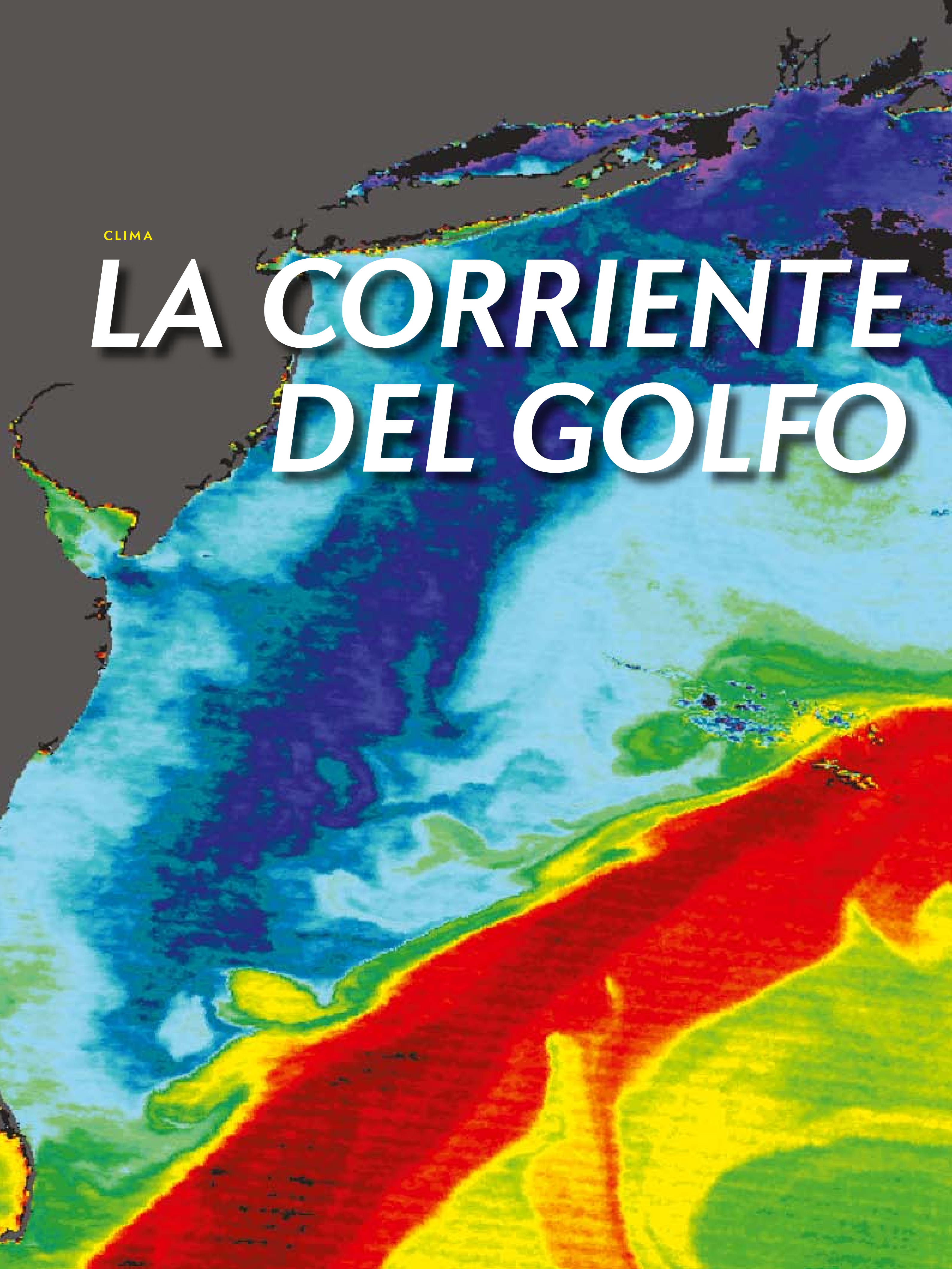
Aunque muchos expertos sospechan que quizá no se llegue a reconstruir jamás una imagen completa de nuestros antepasados homininos, ese obstáculo no les hace desistir de intentarlo. Pero este campo de estudio tan cambiante necesitará más fósiles como los de Ardi y Burtele que sacudan el árbol establecido. Debemos estar preparados para reconocer que nos hallábamos equivocados, afirma DeSilva. Mejor así, porque ello significa que la realidad es mucho más interesante y sorprendente.

Katherine Harmon *es editora de* Scientific American. *La escritora científica Sharon Begley realizó aportaciones adicionales al artículo.*

PARA SABER MÁS

***Ardipithecus ramidus* and the paleobiology of early hominids.** Tim D. White et al. en *Science*, vol. 326, págs. 64 y 75-86, 2 de octubre de 2009.

A new hominin foot from Ethiopia shows multiple Pliocene bipedal adaptations. Yohannes Haile-Selassie et al. en *Nature*, vol. 483, págs. 565-569, 29 de marzo de 2012.



CLIMA

LA CORRIENTE DEL GOLFO

Rojo intenso: En esta imagen infrarroja del océano Atlántico, la corriente del Golfo (*rojo*) se corresponde con las temperaturas más cálidas; las zonas amarillas, verdes, azules y violáceas indican progresivamente aguas más frías.

Y EL INVIERNO EUROPEO

¿Es el flujo de aguas cálidas tropicales lo que provoca que Europa experimente inviernos relativamente benignos? Quizá no

Stephen C. Riser y M. Susan Lozier

EN SÍNTESIS

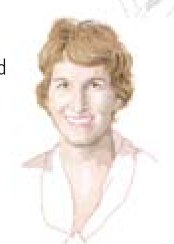
Tres nuevos estudios climáticos indican que nuestra arraigada creencia de que la corriente del Golfo suaviza los inviernos europeos podría resultar incorrecta.

Dos de esos tres estudios atribuyen un papel clave a la dirección en que soplan los vientos preponderantes. El tercero se centra en el calor perdido por el océano.

Al contrario de lo que se pensaba hasta ahora, numerosos modelos indican que una fusión masiva del hielo ártico no implicaría la interrupción de la corriente del Golfo.

La cuestión podría zanjarse en una década gracias a Argo, una red global de más de 3000 sensores que cartografía la temperatura y salinidad hasta 2000 metros de profundidad.

Stephen C. Riser enseña oceanografía en la Universidad de Washington. Ha sido miembro del Consorcio Argo en EE.UU., así como del equipo de dirección internacional del proyecto.



M. Susan Lozier es profesora de oceanografía física en la Escuela Nicholas de Medioambiente en la Universidad Duke. Forma también parte del Equipo Científico de Circulación Meridional Atlántica de Retorno de EE.UU.

Desde hace un siglo se viene enseñando en los colegios que una gran corriente oceánica, la corriente del Golfo, transporta agua cálida desde las regiones tropicales del océano Atlántico hacia el noroeste de Europa. Al llegar a su destino, esa agua calienta las masas de aire situadas encima, que luego se desplazan hacia el interior del continente y provocan que, en Europa, el invierno resulte más benigno que en el nordeste de EE.UU.

Quizás haya llegado el momento de abandonar un concepto tan arraigado. El estallido de interés por el clima del planeta ha incitado a los expertos a revisar con detalle la influencia de la corriente del Golfo. A partir de modelos numéricos y datos oceánicos, han surgido teorías alternativas que explican de manera novedosa por qué los inviernos en el norte de Europa no suelen ser tan duros como los que, en las mismas latitudes, afrontan cada año EE.UU. y Canadá. Dichas teorías discrepan en cuanto al papel que desempeña la corriente del Golfo. Una de ellas esclarece, además, las razones por las que el invierno en el noroeste de EE.UU. resulta más cálido que al otro lado del Pacífico, en la región oriental de Rusia.

Al mismo tiempo, algunas investigaciones recientes han puesto en entredicho la creencia popular, mantenida desde hace unos años, de que la fusión del hielo ártico podría suprimir la corriente del Golfo y causar estragos en el tiempo europeo. A pesar de todo, los estudios indican que el cambio climático sí podría afectar a la intensidad de la corriente, lo que tal vez atenuase el impacto del calentamiento global en el norte de Europa.

TEORÍAS RIVALES

Las variaciones climáticas entre los diferentes lugares del planeta derivan, en esencia, de la forma esférica de la Tierra. En las latitudes bajas los rayos solares inciden más perpendiculares a la superficie que en las latitudes altas, por lo que transmiten más calor por unidad de área. Ese calentamiento diferencial activa los vientos preponderantes del planeta, cuyas inestabilidades redistribuyen el calor desde los trópicos hacia los polos. Los océanos, que cubren el 70 por ciento de la superficie del globo, cumplen asimismo una función clave en dicha redistribución: tan solo la capa formada por los dos metros más superficiales de las aguas oceánicas almacena más energía solar que toda la atmósfera. Este fenómeno se debe a que el calor específico de un metro cúbico de agua resulta unas 4000 veces mayor que el del mismo volumen de aire (y unas cuatro veces superior al del suelo).

En las latitudes medias, los primeros 100 o 200 metros de agua marina pueden experimentar cambios de temperatura de hasta 10 grados a lo largo del año. Tales variaciones implican la liberación o almacenamiento de una inmensa cantidad de energía térmica. Y puesto que las corrientes oceánicas —como la corriente del Golfo— distribuyen el agua por todo el planeta, el calor absorbido en una región durante el verano puede liberarse más tarde a la atmósfera en otro lugar situado a miles de kilómetros.

Teniendo en cuenta dicho transporte y la capacidad del océano para almacenar calor, no resulta difícil responsabilizar a las corrientes oceánicas del hecho de que, en Irlanda (a unos 50 grados de latitud norte), el invierno sea casi 20 grados Celsius más cálido que en la isla de Terranova (en la misma latitud, pero al otro lado del Atlántico). De igual modo, la temperatura del aire cerca de Vancouver, a 50 grados de latitud norte en el este del Pacífico, resulta unos 20 grados mayor que en el extremo meridional de la península rusa de Kamchatka, en las mismas latitudes.

En el siglo XIX, el geógrafo y oceanógrafo Matthew Fontaine Maury atribuyó el clima relativamente suave del noroeste de Europa a la corriente del Golfo. Este potente flujo oceánico se genera a partir de las aguas cálidas de las regiones tropicales y subtropicales. Corre hacia el norte a lo largo de la costa sudeste de Estados Unidos y, al llegar a los 35 grados de latitud norte, vira hacia el nordeste y se interna en el Atlántico. Maury conjeturó que, al aproximarse a Europa, la corriente inyectaría calor en los vientos del oeste que atraviesan el océano en dirección al continente. También postuló que, en caso de que la intensidad de la corriente del Golfo disminuyera, los vientos invernales serían mucho más fríos y el Viejo Continente sufriría inviernos de tipo ártico. Con el tiempo, la hipótesis de Maury llegó a convertirse en casi un axioma, carente hasta hace poco de comprobación empírica.

Hace una década, sin embargo, Richard Seager, del Observatorio Terrestre Lamont-Doherty de la Universidad de Columbia, y sus colaboradores propusieron una explicación alternativa del suave invierno europeo, la cual no guardaba ninguna relación con la corriente del Golfo. Según esta, cuando la corriente en chorro atmosférica (que circunvala el planeta de oeste a este)

PÁGINAS ANTERIORES: CORTESÍA DE PETER MINNETT Y BOB EVANS, UNIVERSIDAD DE MIAMI/MODIS/NASA

alcanza las montañas Rocosas, comienza a oscilar en dirección norte-sur. Dicha ondulación genera vientos del noroeste que se dirigen hacia el margen occidental de la cuenca Atlántica, así como vientos del sudoeste que se encaminan hacia el margen oriental. Los primeros transfieren aire frío continental al nordeste de EE.UU., mientras que los segundos transportan aire marítimo cálido hacia el noroeste de Europa.

En virtud de dicho modelo, lo que suavizaría el clima europeo no sería la energía térmica transportada por la corriente del Golfo. En su lugar, el calor se almacenaría durante el verano en los 100 metros más superficiales del océano, muy lejos de las costas europeas; después, se liberaría a la atmósfera en invierno, cuando los vientos del sudoeste agitan las aguas oceánicas superficiales. Por tanto, la conjetura de Maury sería incorrecta: la diferencia de temperaturas a ambos lados del Atlántico respondería, por un lado, a la distribución de los vientos a gran escala, modelada por las cadenas montañosas; por otro, al calor almacenado localmente en el océano en las cercanías de Europa.

Sin embargo, las simulaciones numéricas de Seager no consideraban de manera explícita el transporte de energía térmica a través del océano. Esa cuestión fue abordada poco después en un estudio de Peter Rhines, de la Universidad de Washington, y Sirpa Häkkinen, del Centro Goddard de Vuelos Espaciales de la NASA. En él los autores esgrimían un argumento que, en cierto modo, venía a apoyar las ideas de Maury desde un punto de vista moderno. Tras revisar las temperaturas de la superficie oceánica, los investigadores concluían que la cantidad de calor almacenada en la capa superior del Atlántico Oriental en las latitudes del norte de Europa solo alcanzaría para suavizar la temperatura del aire durante el mes de diciembre. Por tanto, el calor adicional requerido para moderar el clima durante el resto del invierno debía proceder de alguna otra parte. Y la fuente más probable era la corriente del Golfo, dirigida hacia el nordeste.

Los datos muestran que, a 35 grados de latitud norte, el Atlántico transporta unos 0,8 petavatios de calor hacia las regiones septentrionales, sobre todo por efecto de la corriente del Golfo. Sin embargo, a 55 grados de latitud norte la energía térmica dirigida hacia el polo resulta insignificante. ¿Adónde va a parar todo ese calor? Rhines y Häkkinen propusieron que el océano lo liberaría a la atmósfera en el curso de la corriente del Golfo y, después, los vientos lo transportarían hacia el este, lo que suavizaría el clima europeo. Por tanto, mientras que Seager atribuía el fenómeno a los efectos de la corriente en chorro, Rhines y Häkkinen argumentaban, en esencia, a favor de la conjetura de Maury.

En 2011, Yohai Kaspi, ahora en el Instituto Científico Weizmann de Rejóvot, en Israel, y Tapio Schneider, del Instituto de Tecnología de California, propusieron una tercera idea. Adjudicaban cierto grado de validez tanto a las ideas de Seager como a las de Rhines y Häkkinen, si bien sus estudios se centraron en la distribución de la presión atmosférica. Sus modelos numéricos de la atmósfera y el océano sugerían que, allí donde la corriente del Golfo abandonaba la costa este de EE.UU., la transferencia de calor desde el océano hacia la atmósfera generaba un sistema estacionario de bajas presiones en el este, al lado europeo del Atlántico. Al mismo tiempo, aparecería un núcleo de altas presiones hacia el oeste, sobre la costa oriental de Norteamérica. Por razones complejas, tal configuración provocaría que el sistema de bajas presiones entregase aire caliente al oeste de Europa por medio de los vientos del sudoeste de la corriente en chorro, los cuales absorberían el calor liberado durante el invierno por la corriente del Golfo. Por su parte, el sistema de altas presiones atraería el aire frío del Ártico hacia Norteamérica, lo cual acentuaría la diferencia de temperaturas con respecto a Europa.

Por tanto, las diferencias climáticas a ambos lados del Atlántico no solo responderían a un incremento de las temperaturas en Europa, sino también a un enfriamiento de la región oriental de Norteamérica. La temperatura característica de cada zona se hallaría correlacionada con los patrones de circulación atmosférica, derivados a su vez de la pérdida de calor en el océano en las inmediaciones de la corriente del Golfo.

Sin embargo, la cantidad de calor que hace falta para establecer dicho patrón de circulación no puede provenir únicamente de la que la región central del Atlántico absorbe durante el verano. Se requiere también el calor transportado por la corriente del Golfo desde latitudes más bajas; en este sentido, Kaspi y Schneider otorgan cierto crédito a la antigua teoría de Maury. Y aunque la generación de los sistemas de altas y bajas presiones puede explicarse sin necesidad de acudir a la interacción de la corriente en chorro con las montañas Rocosas, el nuevo trabajo enfatizaba la importancia de los vientos del sudoeste para llevar el calor hacia Europa.

Además, el modelo Kaspi-Schneider también permitiría explicar por qué la costa oeste de EE.UU. y Canadá experimenta inviernos mucho más benignos que los de la península de Kamchatka, en Rusia. Este contraste transpacífico nunca se ha atribuido a la corriente de Kuroshio (la homóloga en el Pacífico a la corriente del Golfo) debido a la enorme extensión del Pacífico y a la menor intensidad de la corriente de Kuroshio. Sin embargo, los resultados de Kaspi y Schneider indican que el calor perdido por la corriente de Kuroshio podría inducir un sistema estacionario de presiones atmosféricas similar al que se observa en Norteamérica y el Atlántico. Por tanto, este transferiría aire polar al noroeste asiático por acción de los vientos del noroeste, mientras que los vientos del sudoeste portarían aire caliente a la región septentrional de la costa oeste de EE.UU.

EL CESE DE LA CORRIENTE DEL GOLFO

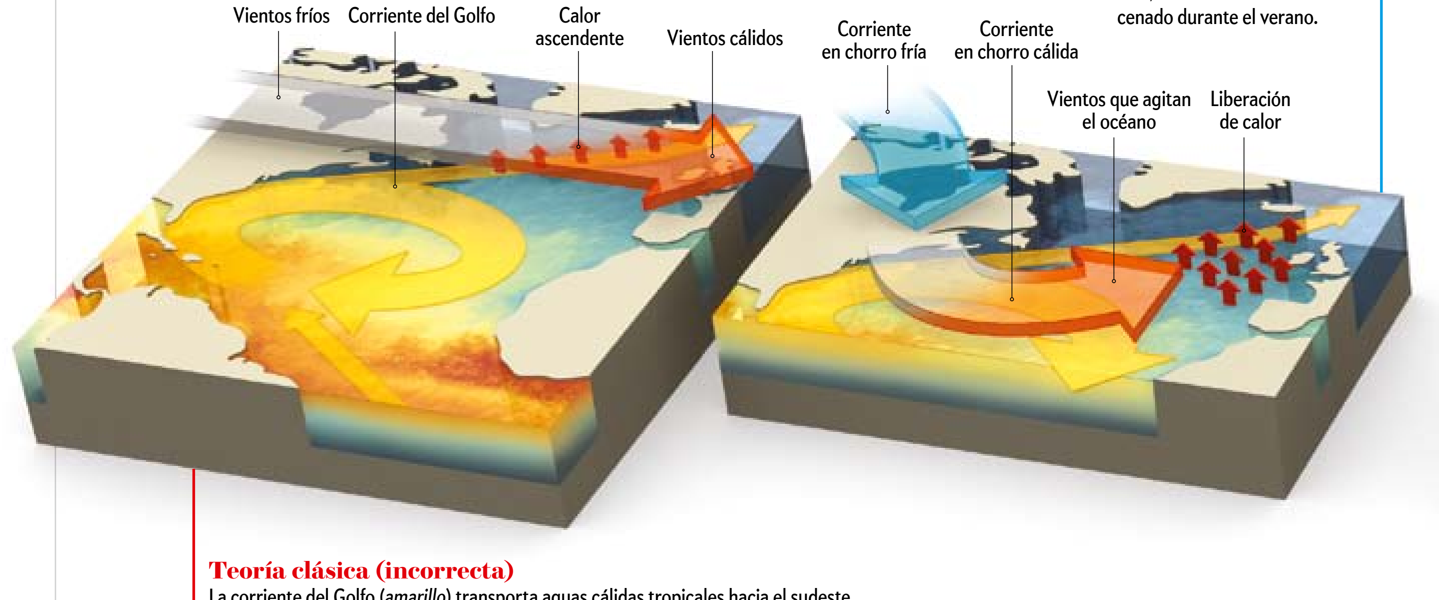
Aún desconocemos cuál de los tres modelos propuestos es el correcto, si bien el escenario planteado por Kaspi y Schneider parece plausible. Por otro lado, también la segunda parte de la conjetura de Maury (según la cual el cese de la corriente del Golfo acarrearía inviernos más crudos en el noroeste de Europa) ha suscitado en fecha reciente un interés considerable. Durante muchos años, el papel desempeñado por la corriente del Golfo en el cambio climático se ha planteado de la siguiente manera: si, como consecuencia de un clima más cálido, se fundiera el hielo del Ártico, ¿reduciría ese exceso de agua dulce en el Atlántico Norte la circulación de retorno regional? ¿Acabaría con la corriente del Golfo y privaría al noroeste europeo de una importante fuente de calor?

La circulación de retorno consta de una corriente de aguas cálidas superficiales que, en el Atlántico Norte, se desplazan hacia el polo, así como de un flujo de aguas frías profundas en dirección sur, hacia el ecuador. Ambas corrientes —someras y profundas— se hallan conectadas: forman una especie de cinta transportadora en la que las aguas superficiales y frías se hunden en las latitudes altas de los mares del Labrador y del Norte, mientras que las aguas profundas y relativamente cálidas ascienden en otras regiones de la cuenca.

Según varios modelos de calentamiento climático, la fusión de hielo ártico aportaría una ingente cantidad de agua dulce en

¿Por qué goza Europa de inviernos más cálidos?

Una hipótesis planteada cien años atrás sostiene que el agua cálida de la corriente del Golfo provoca que el invierno en Europa resulte más benigno que en otras regiones del globo situadas en idénticas latitudes. Sin embargo, algunas propuestas recientes atribuyen el fenómeno a la corriente en chorro (vientos preponderantes) y a las masas de aire árticas.



Teoría 1: Corriente en chorro
Una corriente en chorro ondulante se dirige hacia Europa desde el sudoeste. Los vientos agitan la superficie cálida oceánica, la cual libera el calor almacenado durante el verano.

Teoría clásica (incorrecta)
La corriente del Golfo (*amarillo*) transporta aguas cálidas tropicales hacia el sudeste de EE.UU. y cruza luego el Atlántico en dirección a Europa. Según la teoría tradicional, cuando esa agua alcanza las proximidades del Viejo Continente, calienta las masas de aire situadas por encima. Después, el viento arrastraría el aire cálido tierra adentro.

EMILY COOPER

las latitudes altas del océano. Pero, dado que el agua dulce contiene menos sal que la marina (y, por tanto, es menos densa), esa agua de fusión no se hundiría, lo cual inhibiría el descenso de aguas que nutre las corrientes profundas de la circulación de retorno. En tal caso no existirían razones físicas para que el agua profunda y cálida ascendiera en otras regiones, ya que no habría hundimiento de aguas que compensar. Y, al no haber transporte de aguas cálidas hacia la superficie, el flujo de las mismas hacia el norte (la corriente del Golfo) disminuiría. Otros escenarios sostienen que la adición de agua dulce en latitudes altas desviaría la corriente del Golfo hacia el sur o atenuaría su intensidad. En cualquier caso, una corriente del Golfo debilitada o desviada suministraría una menor cantidad de calor a los inviernos europeos. Numerosos modelos establecen una clara correlación entre una circulación de retorno más débil y un enfriamiento en el Atlántico Norte y el noroeste de Europa.

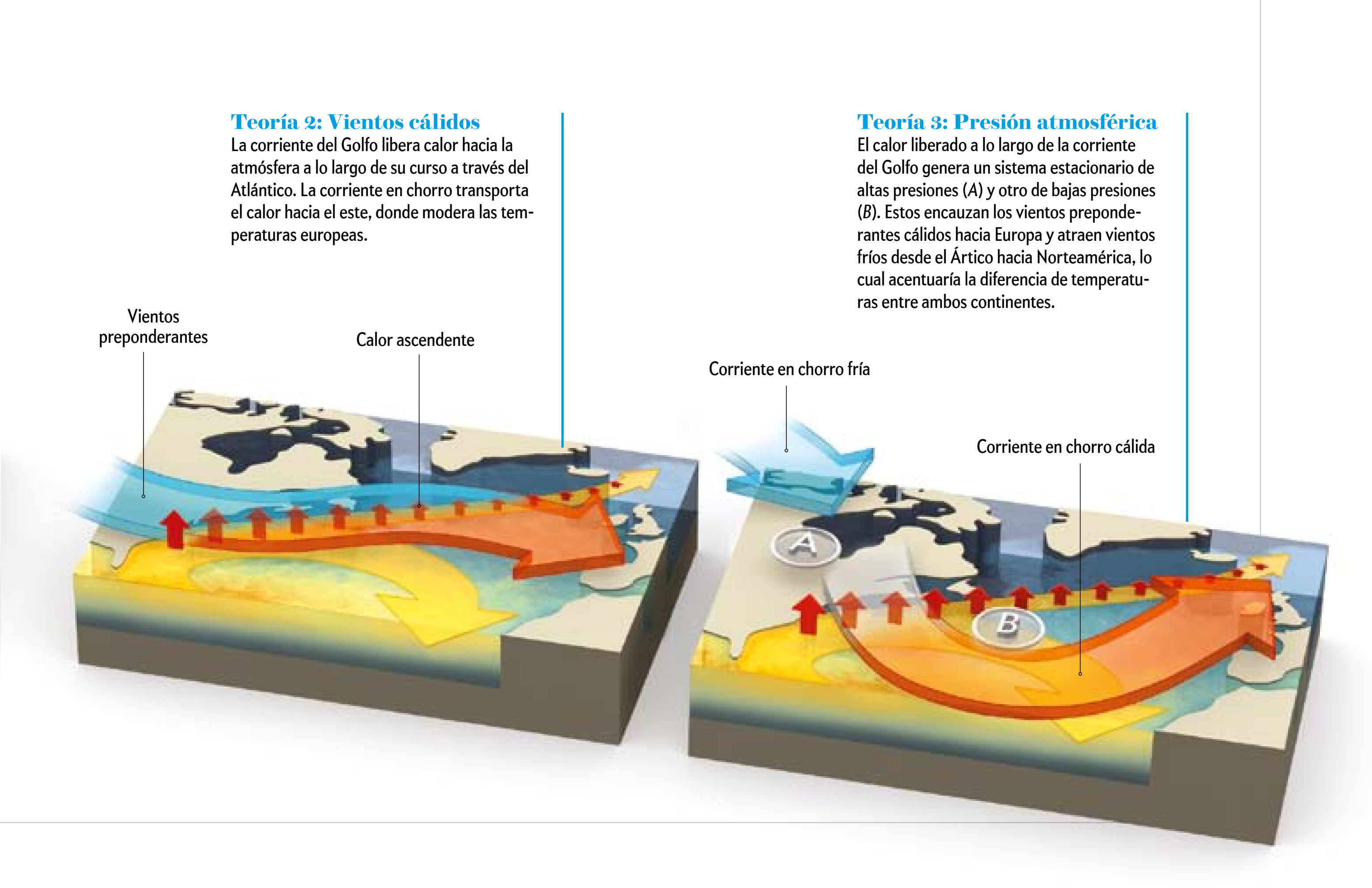
Con todo, los últimos modelos de alta resolución de corrientes oceánicas indican que la mayor parte del agua de fusión del Ártico se integraría en las corrientes más restringidas a la línea de costa. De esta manera, ejercerían una menor influencia en el océano abierto, que constituye la zona principal de hundimiento. Y aun cuando la cantidad de agua de fusión afectara al volumen de agua que se hunde en el Atlántico Norte, una interrupción de la corriente del Golfo se antoja improbable. La razón reside en que la trayectoria y la intensidad de la corriente del Golfo dependen, en gran medida, de la velocidad y la dirección de los vientos a gran escala que soplan en las latitudes medias. En la mayoría de los escenarios de cambio climático, la dirección general de los vientos a gran escala no varía de modo sustancial a medida que progresa la fusión del hielo ártico, por lo que la corriente del Golfo tampoco se modificaría en exceso.

No obstante, la extensión hacia el nordeste de la corriente del Golfo (la ramificación, relativamente pequeña, que transporta aguas cálidas superficiales hacia las regiones subpolares) sí que podría quedar paralizada. Por tanto, el conjunto de registros pone de manifiesto que la corriente del Golfo persistiría, pero aún desconocemos qué fracción de agua se dirigiría hacia el norte.

MÁS DATOS, MEJOR RESOLUCIÓN

A día de hoy, las hipótesis sobre el modo en que el cambio climático afectará al tiempo en Europa se basan sobre todo en simulaciones numéricas. Sin embargo, dichas simulaciones presentan incertidumbres considerables, las cuales solo podrán subsanarse integrando una mayor cantidad de datos oceánicos. Hoy por hoy, la mayoría de los datos relativos al océano abierto apenas cuenta con un siglo de antigüedad, mientras que los datos procedentes de satélites no se remontan más allá de 30 años.

En ese sentido, en fecha reciente se han realizado progresos notables gracias al proyecto Argo. Operada por más de 30



países, la red Argo consta de más de 3000 sensores flotantes que, distribuidos por todo el planeta, permiten cartografiar en tiempo casi real la temperatura y la salinidad en los 2000 metros más superficiales de los océanos. Completada hace menos de una década, está comenzando a utilizarse para examinar la relación entre la variabilidad atmosférica y los cambios oceánicos a gran escala.

Entre otra iniciativas, Dean Roemmich y John Gilson, del Instituto Scripps de Oceanografía, compararon los datos de Argo con las observaciones oceánicas del decenio de los ochenta. Su trabajo demostró que los primeros centenares de metros de la superficie del mar se han calentado unos 0,2 grados Celsius durante los últimos 20 años. La salinidad global de la región superficial del océano se ha incrementado ligeramente en un 0,1 por ciento, si bien a mayores profundidades las aguas parecen ser considerablemente más dulces que en décadas anteriores.

Si tales cambios acabarán por alterar o no el clima en Europa o en otras regiones continúa siendo un problema por resolver. Con todo, los datos de Argo nos proporcionan algunas pistas. Para que la Tierra no se caliente ni se enfríe, el aporte térmico procedente del Sol debe igualar a la cantidad de calor que el planeta irradia al espacio. La acumulación atmosférica de gases de efecto invernadero parece estar perturbando dicho equilibrio. Por su parte, el calentamiento de 0,2 grados observado en la región superficial del océano concuerda con un exceso de radiación solar incidente respecto a la irradiada de en torno a un vatio por metro cuadrado.

Los primeros resultados obtenidos por nuestro observatorio oceánico están proporcionando una gran cantidad de datos a las teorías y modelos climáticos. Asimismo, aportan indicios sobre lo que podría acontecer en las décadas venideras. Durante los próximos diez años, a medida que se analicen los datos de satélites relativos a la superficie oceánica, los modelos computacionales y una mayor cantidad de datos subsuperficiales procedentes de Argo, estaremos en condiciones de evaluar con mayor precisión la influencia que ejerce el océano sobre el clima. Para entonces, podremos determinar hasta qué punto la corriente del Golfo afectará al cambio climático en nuestro acuoso planeta.

PARA SABER MÁS

Is the Gulf Stream responsible for Europe's mild winters? R. Seager et al. en *Quarterly Journal of the Royal Meteorological Society*, vol. 128, n.º 586, págs. 2563-2586, octubre de 2002.
The 2004-2008 mean and annual cycle of temperature, salinity, and steric height in the global ocean from the Argo program. Dean Roemmich y John Gilson en *Progress in Oceanography*, vol. 82, n.º 2, págs. 81-100, agosto de 2009.
Winter cold of eastern continental boundaries induced by warm ocean waters. Yohai Kaspi y Tapio Schneider en *Nature*, vol. 471, págs. 621-624, 31 de marzo de 2011.
Inviernos extremos. Charles H. Greene en *Investigación y Ciencia*, febrero de 2013.

por Nagore Sampedro y Laura Arin

Espumas y mucílagos marinos

La observación microscópica de muestras de espumas ayuda a determinar el factor causante de estas

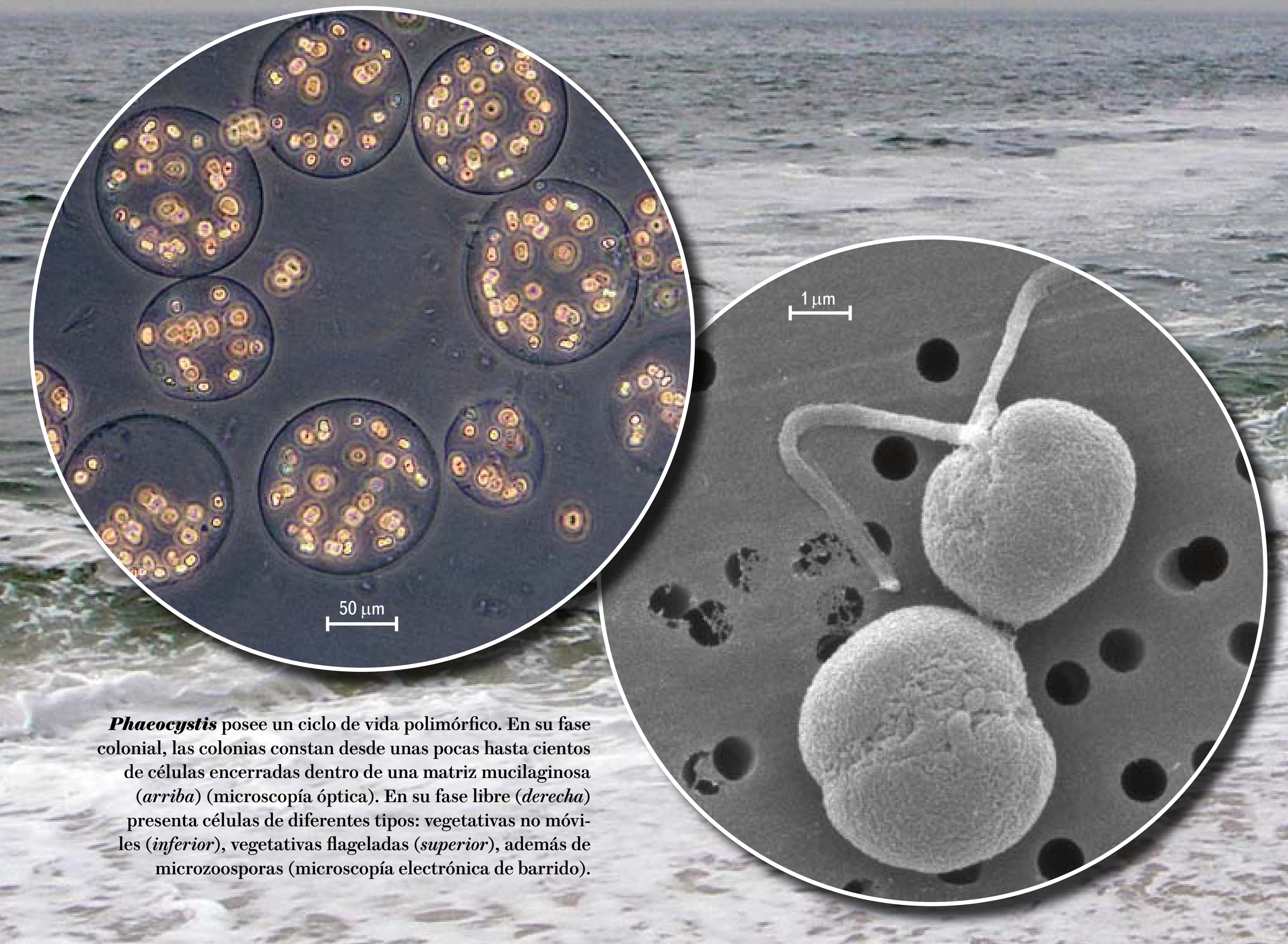
La presencia de espumas y mucílagos en aguas costeras es un fenómeno inherente al mar. Se forman como consecuencia de procesos complejos, ya sean físicos o biológicos, condicionados por las características ambientales. El origen de las espumas y mucílagos se asocia a las actividades humanas, como el vertido de aguas residuales, o a ciertos fenómenos naturales, como la presencia de microalgas planctónicas (fitoplancton).

Su acumulación en aguas costeras puede tener repercusiones negativas en la pesca (obstruye las redes) y en la industria turística (confiere un mal aspecto al agua), de ahí la importancia de conocer el factor causante de tales fenómenos. La observación microscópica de muestras de espumas y mucílagos permite, en algunos casos, determinar la especie de fitoplancton que las ha originado. Sin embargo, si existe un desfase espacial o temporal entre el organismo que lo produce y la aparición de espumas o mucílagos en el agua, muchas veces resulta difícil averiguar la especie fitoplanctónica responsable. La adhesión y la colonización de otros organismos sobre estas matrices dificulta aún más la identificación.

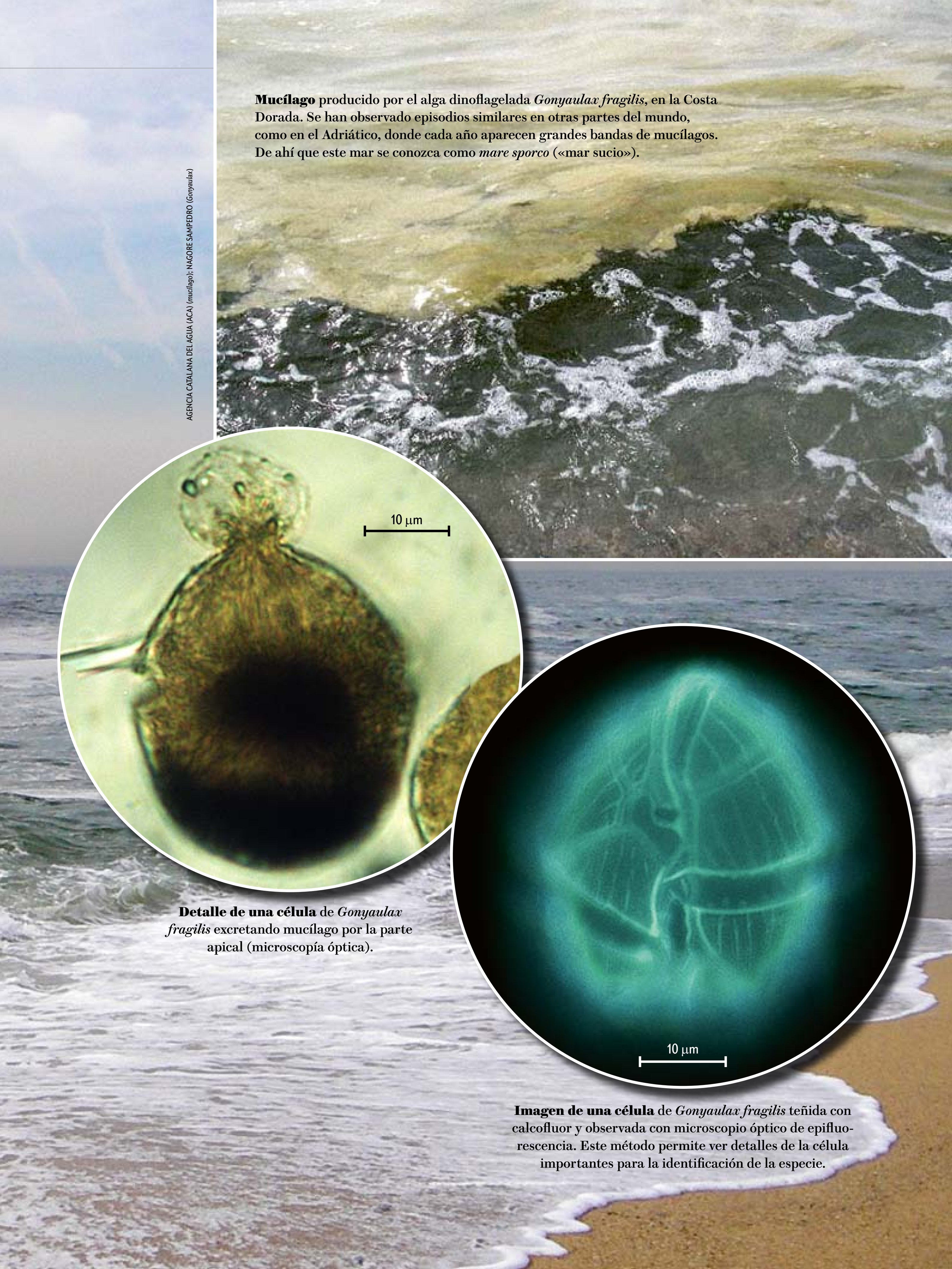
La formación de espumas y mucílagos por parte de microorganismos fitoplanctónicos responde a diversas causas. En el caso del alga unicelular *Phaeocystis*, puede deberse a la proliferación de su fase colonial, como consecuencia de una escasa depredación de las colonias por otros organismos o la presencia de abundante materia orgánica en el mar. En todo caso, los vientos fuertes parecen ejercer una influencia determinante en su aparición. Esta especie ha generado espumas en la costa mediterránea (*imagen de fondo*), aunque las más espectaculares suelen observarse en el mar del Norte.

—Nagore Sampedro y Laura Arin
Instituto de Ciencias del Mar (CSIC), Barcelona

AGENCIA CATALANA DEL AGUA, (*fondo*); LAURA ARIN Y JOSÉ MANUEL FORTUÑO (*Phaeocystis*)



Phaeocystis **posee un ciclo de vida polimórfico. En su fase colonial, las colonias constan desde unas pocas hasta cientos de células encerradas dentro de una matriz mucilaginosa (*arriba*) (microscopía óptica). En su fase libre (*derecha*) presenta células de diferentes tipos: vegetativas no móviles (*inferior*), vegetativas flageladas (*superior*), además de microzoosporas (microscopía electrónica de barrido).**



Mucílago producido por el alga dinoflagelada *Gonyaulax fragilis*, en la Costa Dorada. Se han observado episodios similares en otras partes del mundo, como en el Adriático, donde cada año aparecen grandes bandas de mucílagos. De ahí que este mar se conozca como *mare sporco* («mar sucio»).

AGENCIA CATALANA DEL AGUA (ACA) (*mucílago*); NAGORE SAMPEDRO (*Gonyaulax*)

Detalle de una célula de *Gonyaulax fragilis* excretando mucílago por la parte apical (microscopía óptica).

Imagen de una célula de *Gonyaulax fragilis* teñida con calcofluor y observada con microscopio óptico de epifluorescencia. Este método permite ver detalles de la célula importantes para la identificación de la especie.

por Oliver Hochadel

Oliver Hochadel es investigador de la Institución Milà i Fontanals del Consejo Superior de Investigaciones Científicas en Barcelona.



Una industria de los orígenes

Atapuerca y la nueva cuna de la historia de España

Alrededor del cambio de milenio, el yacimiento paleontológico de Atapuerca, una pequeña sierra al este de Burgos, experimentó en poco más de una década una transformación radical. Un lugar conocido solamente por investigadores pasó a ocupar una posición primordial en el imaginario colectivo del público español, para quien se convirtió en la cuna de la historia de España. Este artículo analiza cómo se produjo esta transformación y qué la hizo posible.

El cambio respondió, claro está, a una espectacular serie de hallazgos de fósiles de homínidos; pero también a la industria de divulgación que los mismos investigadores construyeron alrededor de su proyecto.

Empecemos por los descubrimientos. Las investigaciones en Atapuerca se iniciaron en 1978 [*véase* «Homo de Atapuerca», por Emiliano Aguirre; Investigación y Ciencia, noviembre de 1978]. Desde 1992, los paleoantropólogos Juan Luis Arsuaga y José María Bermúdez de Castro, junto al arqueólogo Eudald Carbonell, han codirigido el Equipo de Investigación de Atapuerca (EIA). La Sima de los Huesos, una de las cavidades de la sierra, fue bautizada como «la capilla Sixtina de la prehistoria». En ella se han encontrado, hasta ahora, más de 6000 restos fósiles de *Homo heidelbergensis* pertenecientes a, al menos, 28 individuos. Los fósiles tendrían, según estos investigadores, más de 530.000 años de antigüedad; en la opinión de otros científicos, en cambio, solo poco más de 300.000. En 1994 se recuperaron en la Gran Dolina, otro de los yacimientos de Atapuerca, fósiles de más de 800.000 años, por entonces los más antiguos de Europa [*véase* «Los yacimientos de Atapuerca», por E. Aguirre; Investigación y Ciencia, octubre de 1995]. El EIA propuso en 1997 una nueva especie de homínido, el *Homo antecessor* (hombre pionero). En 2008, finalmente, el EIA batió su propio récord al datar una mandíbula de homínido encontrada en otro de los yacimientos de la sierra, la Sima del Elefante, en 1,2 millones de años. Estos resultados fueron publicados en las revistas científicas de mayor prestigio, como *Science* y *Nature*.

La industria de la divulgación

A raíz de la serie de hallazgos de los noventa, los tres codirectores del proyecto priorizaron la divulgación de su trabajo a través de, literalmente, todos los medios. Es muy común que los estudiosos del origen de la humanidad se dirijan a un público amplio, para el que las cuestiones de orígenes e identidad son de gran interés («¿De dónde venimos?»). Pero la dimensión de la industria de divulgación de Atapuerca no tiene parangón. Por poner solo algunos ejemplos destacados: desde 1998, los tres codirectores del proyecto han escrito casi 30 libros de divulgación; entre 1999 y 2009 varias exposiciones sobre Atapuerca y la evolución humana atrajeron a millones de visitantes en docenas de ciudades españolas; se ofrecen visitas guiadas a la sierra de Atapuerca, que cuenta con un parque arqueológico; y en 2010, la misma Reina Sofía inauguró el Museo de la Evolución Humana, una enorme estructura en el centro de Burgos que costó 70 millones de euros.

El gran impacto público del proyecto de investigación responde, ante todo, a la estrecha conexión entre el EIA y los medios de comunicación. Bermúdez de Castro y Carbonell se refieren a los periodistas como «nuestros amigos». Los investigadores han sabido instrumentalizar a los medios para promover su proyecto. Los centenares de artículos de prensa publicados en España apenas contienen una palabra crítica con el proyecto y los lectores españoles no han tenido noticia de las críticas formuladas por investigadores extranjeros. La hipótesis del EIA según la cual *Homo antecessor* podría ser el ancestro común de *Homo sapiens* y los neandertales, por ejemplo, no ha sido aceptada en otros países. Sin embargo, los investigadores de Atapuerca han legitimado sus afirmaciones gracias a su omnipresencia en los medios de comunicación, por lo menos en España.

El control del EIA sobre la interpretación de sus descubrimientos parecería casi completo, pero la situación es más compleja de lo que parece. Estudios históricos recientes muestran que la ciencia y los medios de comunicación establecen relaciones de dependencia mutua. Para alcanzar a un público amplio, los científicos deben adaptar sus resultados a la lógica de los medios. El EIA no es una excepción. Una de las condiciones es usar superlativos: «el europeo *más antiguo*» (*Homo antecessor*); «la *mayor concentración* de fósiles de homínidos *en todo el mundo*» (la Sima de los Huesos); «*el primer acto simbólico* de la historia de la humanidad» (Excalibur, una herramienta de piedra depositada en la Sima de los Huesos), etcétera.

Por otro lado, los investigadores de Atapuerca son conscientes de las exigencias de los medios de comunicación y tratan de contrarrestarlas. A veces, insisten en que no son «cazadores de fósiles» y que su trabajo científico no consiste en ganar premios, sino que tiene por objeto la reconstrucción del contexto ecológico de los primeros humanos. Carbonell, por ejemplo, critica el «fetichismo del descubrimiento» porque, en su opinión, dificulta la adquisición del verdadero conocimiento. Pero los investigadores difícilmente pueden eludir este fetichismo porque es lo que piden los medios y también los políticos, en especial los de la Junta de Castilla y León, que ha financiado gran parte de las excavaciones.

Los medios de comunicación requieren asimismo que se personalice la investigación. Aunque el EIA cuenta con más de cien investigadores, sus tres codirectores, y Arsuaga en particular, son la cara pública del proyecto. Aun rechazando la

etiqueta de cazadores de fósiles, se adhieren a la imagen del arqueólogo aventurero. Arsuaga se ha descrito a sí mismo como «un cóctel entre Darwin e Indiana Jones» y Carbonell, la cara más visible del proyecto en Cataluña, no se desprende de su icónico salacot.

Nacionalismo científico

Pero la simbiosis entre investigadores, periodistas y políticos en el caso de Atapuerca no termina aquí. La cobertura mediática del proyecto adquirió en los noventa un tono nacionalista. Atapuerca fue presentado como el más importante yacimiento paleontológico de Europa y uno de los más ricos del mundo. Podría pensarse que es natural que un país se sienta orgulloso de sus tesoros prehistóricos y, sin duda, así es. Sin embargo, la caracterización de Atapuerca como un caso de éxito para la ciencia española va más allá de ese sentimiento; tiene una dimensión histórica importante.

Desde el siglo XIX, los intelectuales españoles habían considerado que la ciencia en España estaba atrasada en relación con la de potencias como Francia, Gran Bretaña o los Estados Unidos. Esta percepción se mantuvo a lo largo del siglo XX. El consenso dominante era que resultaba necesario acortar esa distancia para completar la modernización del Estado. El reconocimiento nacional e internacional de Atapuerca constituía, desde esta perspectiva, un magnífico antídoto contra este «complejo de inferioridad» y convirtió al EIA en una referencia nacional sobre el modo de hacer ciencia. En el campo de la prehistoria, el proyecto de Atapuerca mostraba la manera de acabar con el «colonialismo científico». Desde el descubrimiento de las pinturas rupestres de Altamira, a finales del siglo XIX, los prehistoriadores españoles habían creído que la investigación en su propio país estaba dominada por extranjeros, sobre todo por franceses, pero también por científicos de otras nacionalidades. Las escaramuzas retóricas contra los «colonialistas» dieron cohesión a la comunidad científica española y contribuyeron a su profesionalización. Atapuerca se concibió desde el principio como un proyecto español. En él han participado muy pocos científicos de otros países, que nunca han ocupado puestos directivos. Los directores del proyecto lo expresaban con claridad: «Se trata de nuestros fósiles, nosotros trabajaremos con ellos y después publicaremos los resultados». Atapuerca había de ser la «cantera» de los investigadores españoles.



FUNDACIÓN ATAPUERCA

Divulgar es crucial: Los codirectores de Atapuerca en rueda de prensa.

Cabe describir esta concepción del proyecto de investigación en términos de «nacionalismo científico». Pero hay otra forma de apropiación de los fósiles de homínidos. Nos referimos a la «continuidad biológica», que asume o por lo menos alude a cierta conexión histórica profunda entre los actuales habitantes de España y los primeros habitantes de la sierra de Atapuerca. Esta idea convirtió a Atapuerca en la nueva cuna de la historia de España. El 22 de septiembre de 2000, Correos lanzó una serie de sellos sobre «Historia de España» que incluía «El Hombre de Atapuerca (800.000 años)». Ese mismo año los fósiles de Atapuerca fueron expuestos en el pabellón español de la Expo 2000, celebrada en Hanóver. En la Expo 2010 de Shanghai, el pabellón español se refería a la sierra de Atapuerca como el «ADN de España». Los fósiles se han convertido en embajadores del país por todo el mundo.

Podemos considerar también las historias generales de España publicadas en los últimos años. El historiador Fernando García de Cortázar publicó en 2002 una *Historia de España* subtitulada *De Atapuerca al Euro*, en la que se presentaba al *Homo antecessor* como el primer hombre que había habitado «suelo ibérico». En 2006, García de Cortázar publicó una edición revisada de la obra, subtitulándola *De Atapuerca al Estatut*. El presente cambia, pero el inicio sigue siendo el mismo. No resulta casual que la mayoría de los autores que sitúan Atapuerca como el inicio de la historia de España se encuentren a la derecha del espectro ideológico, ya se trate de conservadores moderados como García de Cortázar, o de periodistas abiertamente de derechas como Jaime Campmany. La antigüedad del lugar podía utilizarse para argumentar la unidad de la nación española y la existencia de una historia común que se remontaría a la época romana o incluso antes.

Los investigadores no aprueban la politización de su yacimiento; no utilizan nunca la expresión «primer español» para referirse al *Homo antecessor*, sino «nuestros ancestros». Esta flexibilidad constituye, tal vez, otra de las claves del enorme éxito del proyecto. Los fósiles tanto pueden representar el éxito de la ciencia que se hace en España, como sustentar la noción de una historia común que hunde sus raíces en la prehistoria. «Nuestros ancestros» puede referirse a la especia humana, a los europeos, a los españoles o incluso a los burgaleses. El proyecto de Atapuerca ha generado una auténtica industria de los orígenes.

PARA SABER MÁS

La razón estrangulada. La crisis de la ciencia en la sociedad contemporánea. Carlos Elías. Random House Mondadori, Barcelona, 2008.

Art caves as symbolic spaces. The case of Altamira. Oscar Moro Abadía en *Sites of memory between scientific research and collective representations*, dirigido por Jana Maríková-Kubková, Nathan Schlanger y Sonia Lévin. Archeolosgicky ústav Akademie ved Ceske republiky, Praga, 2009.

El mito de Atapuerca. Orígenes, ciencia, divulgación. Oliver Hochadel. Ediciones UAB, Bellaterra, 2013.

por Peter Wedhams



Peter Wedhams es profesor de física oceánica en la Universidad de Cambridge.

La espiral de muerte del Ártico

La geoingeniería podría representar la mejor alternativa para salvar lo que queda del hielo marino

En verano de 1970 visité el Ártico por primera vez a bordo del buque oceanográfico canadiense *Hudson*, cuando este realizaba la primera circunnavegación de las Américas. El buque estaba reforzado para romper el hielo y había razones para ello. A lo largo de las costas de Alaska y los Territorios del Noroeste, el hielo del océano Ártico flotaba próximo al continente y nos concedía una franja de escasas millas para realizar nuestras investigaciones. En ocasiones, el hielo se extendía hasta alcanzar la orilla. Todo aquello entraba dentro de la normalidad.

Cualquier buque que hoy se adentre en el Ártico desde el estrecho de Bering en verano, se encontrará ante un océano de aguas abiertas. El agua se extiende hasta latitudes septentrionales considerables y no alcanza el polo norte por apenas unas millas. Visto desde el espacio, el polo terrestre ha dejado de ser blanco para teñirse de azul. Sin embargo, la situación es más alarmante de lo que las apariencias podrían indicar. La cubierta de hielo que aún persiste es delgada: las lecturas de sónar indican que el espesor medio ha menguado un 43 por ciento entre 1976 y 1999. De continuar a este ritmo, hacia 2005 el deshielo estival superará la formación de nuevo hielo en invierno y la cubierta de hielo colapsará en su totalidad. Una vez que el hielo estival desaparezca por completo, los principios físicos del calor latente harán muy difícil, si no imposible, que reaparezca. Habremos caído en lo que Mark C. Serreze, director del Centro Nacional de Hielo y Nieve de la Universidad de Colorado en Boulder, denomina la «espiral de la muerte» del Ártico.

Cuando el deshielo da lugar a las aguas abiertas, el albedo (la fracción de radiación solar que se refleja al espacio) disminuye de 0,6 a 0,1 y con ello se acelera el calentamiento del Ártico. Según mis cálculos, la desaparición del hielo que aún se conserva conllevará un calentamiento terrestre equivalente al derivado de todo el dióxido de carbono emitido en los últimos 25 años. Dado que un tercio del océano Ártico se compone de mares someros de plataforma, el calentamiento de la superficie se difundirá en profundidad hasta alcanzar el fondo marino, derretirá el permafrost costero y causará la liberación de metano, un gas de mayor efecto invernadero que el CO_2. En fecha reciente, una expedición realizada por Rusia y Estados Unidos dirigida por Igor Semiletov ha detectado más de 200 puntos en las costas de Siberia donde el metano asciende desde el fondo marino. Los estudios atmosféricos también indican un aumento en la concentración de metano cuyo origen radica, en gran parte y con toda probabilidad, en las emisiones árticas.

A fin de evitar las consecuencias de un colapso del hielo estival, necesitamos que reaparezca el hielo que hemos perdido. Pero su regeneración supondrá algo más que la sola reducción de las emisiones: debemos revertirlo.

La reducción de las emisiones de carbono y la sustitución de la quema de combustibles fósiles por energías renovables, entre ellas la nuclear, son las soluciones más sensatas a largo plazo, sin lugar a dudas. Pero dichas medidas no van a salvar el hielo ártico. A pesar de décadas de intentos, la concentración de CO_2 continúa aumentando a una velocidad más que exponencial.

Ha llegado el momento de considerar una solución radical: la geoingeniería. Con dicho término me refiero al uso de técnicas artificiales para reducir las temperaturas superficiales mediante el bloqueo de la radiación solar. Una de las propuestas implica el «emblanquecimiento» de nubes bajas mediante la inyección en su interior de finas partículas de agua. Otra sugiere la emisión a la atmósfera de sulfatos sólidos desde globos para generar aerosoles que reflejen la radiación solar. Y otra, mucho más simple, consistiría en pintar de blanco tejados y pavimentos. Con todo, dichas soluciones vendrían a ser como poner una tirita. Deberían aplicarse continuamente, puesto que cualquier interrupción supondría que el calentamiento regresara de forma acelerada. Tampoco combatirían los efectos directos del CO_2 como la acidificación del océano. Pero podrían darnos tiempo.

¿Existe alguna técnica de geoingeniería que pudiera enfriar el planeta entero? ¿Se ha desarrollado algún método que permita enfriar únicamente el Ártico en verano y evitar así que se funda el hielo? ¿Qué consecuencias podrían tener en las precipitaciones y las temperaturas el emblanquecimiento o la emisión de productos químicos sobre el Ártico? Para hallar la respuesta a estas preguntas se requiere una mayor investigación y desarrollo de modelos. Algo que debe realizarse con urgencia. Ya no podemos permitirnos más el lujo de discutir sobre la reducción de las emisiones de CO_2 en algún momento convenientemente lejano en el tiempo. Debemos actuar ahora.

REDUX PICTURES



Yaser S. Abu-Mostafa es profesor de ingeniería eléctrica y ciencias de la computación en el Instituto de Tecnología de California.

INTELIGENCIA ARTIFICIAL

TÉCNICAS DE APRENDIZAJE AUTOMATIZADO

Ciertos algoritmos permiten que las máquinas aprendan y «piensen». Cada vez más a menudo, sus predicciones superan a las de los expertos

Yaser S. Abu-Mostafa

HACE UNOS AÑOS, LOS DIRECTIVOS DE UNA MARCA DE MODA femenina solicitaron mi ayuda para elaborar nuevas propuestas dirigidas a su clientela. Nadie en su sano juicio tomaría en serio mi opinión acerca de un tema del que sé tan poco. Sin embargo, no habían acudido a mí para que les aconsejase sobre moda, sino sobre técnicas de aprendizaje automatizado. Basándome únicamente en sus cifras de ventas y en los resultados de varias encuestas a usuarias, acabé recomendando a mujeres que no conocía artículos que jamás había visto. Aquellos consejos superaron a los de los estilistas profesionales. E insisto: mis nociones sobre moda siguen siendo casi nulas.

El aprendizaje automatizado es la rama de las ciencias de la computación que intenta que una máquina aprenda a partir de la experiencia. Puede aplicarse a cualquier ámbito: búsquedas en Internet, pruebas sanguíneas más precisas o agencias de contactos. En su versión más sencilla, los algoritmos de aprendizaje toman un conjunto de datos, los analizan para buscar en ellos ciertas pautas y, una vez identificadas estas, las emplean para realizar predicciones. Durante la última década, los progresos que ha experimentado este campo lo han transformado hasta tal punto que, hoy por hoy, las computadoras parecen «más inteligentes» que las personas. Pensemos en el ordenador Watson, de IBM, que hace unos años se valió del aprendizaje automatizado para derrotar a los mejores jugadores de *Jeopardy!*, un popular concurso de la televisión estadounidense.

La competición más importante de la especialidad tuvo lugar unos años atrás. Netflix, una compañía de alquiler de películas por Internet, deseaba diseñar un sistema que ayudase a sus clientes a encontrar filmes de su agrado (y no tanto entre los estrenos más solicitados, sino entre los títulos menos conocidos del catálogo). La compañía ya disponía de un sistema de clasificación y recomendación de películas, pero los directivos sabían que distaba de ser perfecto, por lo que convocaron un concurso para mejorarlo. Las reglas eran muy sencillas: el primer concursante que superase en un 10 por ciento los resultados del motor de recomendación previo recibiría un millón de dólares. El reto atrajo a decenas de miles de participantes de todo el mundo.

Para un investigador en aprendizaje automatizado, aquella competición resultaba muy atractiva. Y no solo por la cuantía del premio, sin duda seductora, sino por el volumen de datos: el aspecto más delicado de cualquier sistema de aprendizaje automatizado reside en los datos, y Netlix ponía a disposición de los participantes 100 millones de puntos de datos reales.

PERÍODO DE ADIESTRAMIENTO

La competición de Netflix duró casi tres años. Numerosos grupos abordaron el problema desglosando cada película en largas series de atributos. Un título puede puntuarse atendiendo

EN SÍNTESIS

El aprendizaje automatizado, una rama de las ciencias de la computación, busca analizar grandes cantidades de datos a fin de identificar pautas y realizar predicciones.

Los algoritmos de aprendizaje automatizado pueden emplearse para todo tipo de fines, desde identificar tendencias económicas hasta realizar recomendaciones personalizadas.

Uno de sus principales problemas, sin embargo, surge cuando se emplea demasiada potencia de cálculo para analizar los datos. Ello puede llevar a la máquina a extraer pautas espurias.

a varias categorías, como si es más o menos divertida, la complejidad de la trama o el atractivo físico de los actores. Después, basta con acudir a las películas reseñadas en el pasado por cada espectador y comprobar cómo evaluó cada uno de esos atributos: en qué medida le agradan las comedias, si prefiere argumentos sencillos o complicados, o si siente predilección por las películas con actores atractivos.

El problema se reduce así a emparejar los gustos del espectador con los atributos del filme. Si le gustan las comedias y las tramas de enredo, una buena recomendación sería *Con faldas y a lo loco* o *Un pez llamado Wanda*. Después de que el algoritmo haya asociado docenas de ellos, la sugerencia final debería ajustarse con bastante exactitud a las preferencias del espectador.

Por regla general, solemos pensar en atributos que pueden identificarse con facilidad, como «comedia» o «trama complicada». Pero un algoritmo no necesita realizar tales distinciones. De hecho, los investigadores tampoco se preocupan de analizar el contenido del filme. El algoritmo de aprendizaje comenzará con una serie de atributos aleatorios e innominados. A medida que obtenga datos sobre las calificaciones que los espectadores otorgaron a las películas en el pasado, irá afinando la elección



de nuevos atributos hasta que ello se ajuste a la manera en que los usuarios evalúan las proyecciones. Si los admiradores de la película A suelen asignar buenas puntuaciones a las películas B, C y D, el algoritmo hallará un atributo común a las cuatro. Todo esto sucede en la «fase de adiestramiento», en la que el computador explora millones de calificaciones con el objetivo de conformar un conjunto de atributos basados en valoraciones reales, no en análisis subjetivos.

Los atributos generados por el sistema tal vez no resulten tan inmediatos como los de «comedia» o «drama». De hecho, pueden ser muy sutiles o incluso incomprensibles, ya que lo único que pretende el algoritmo es hallar la mejor manera de predecir los gustos del espectador, no explicarnos cómo lo hace. Si el programa funciona de la manera correcta, no tenemos por qué analizar sus entresijos.

Sin embargo, esa no suele ser la manera de proceder en la vida real. A principios de mi carrera desarrollé un programa de análisis y concesión de créditos para un banco. Una vez concluido, la empresa me pidió que interpretara el significado de cada atributo. El requerimiento no tenía nada que ver con el rendimiento del sistema, ya que este funcionaba de manera satisfactoria. Obedecía a un imperativo legal: un banco no puede denegar un crédito a un cliente sin argumentar por qué. No se le puede enviar una carta diciendo que su solicitud ha sido rechazada solo porque cierto parámetro X era menor que 0,5.

Cada sistema de aprendizaje desarrolla sus propios conjuntos de atributos. Durante las últimas semanas del concurso Netflix, varios grupos que hasta entonces habían estado trabajando de manera independiente empezaron a combinar sus algoritmos mediante técnicas de agregación. En la última hora de la competición, dos equipos se disputaban el primer premio: la puntuación se mostraba ligeramente favorable para The Ensemble, un grupo al que pertenecía uno de los alumnos de doctorado de mi grupo, en el Instituto de Tecnología de California; tras ellos se situaba el equipo BellKor's Pragmatic Chaos. Al final tuvo lugar un empate, ya que ambos habían superado los resultados del sistema original en un 10,06 por ciento. Las reglas estipulaban que, de ocurrir así, el premio recaería en el concursante que primero hubiese enviado la solución. Pragmatic Chaos se había adelantado en veinte minutos a The Ensemble. Después de tres años de carrera, esos veinte minutos les valieron un millón de dólares.

AJUSTE PERFECTO

El tipo de aprendizaje automatizado empleado en el concurso de Netflix recibe el nombre de aprendizaje supervisado. Este método puede aplicarse también a otras tareas, como la diagnosis médica. Supongamos que introducimos en un computador miles de imágenes de leucocitos extraídas de las historias clínicas de pacientes y, al mismo tiempo, le informamos sobre si cada una de ellas corresponde a una célula cancerosa o sana. A partir de esos datos, el algoritmo aprenderá a utilizar ciertos atributos de la célula (forma, tamaño y color, tal vez) para identificar aquellas malignas. En tales casos, el investigador «supervisa» el aprendizaje de la máquina: para cada imagen, le proporciona la respuesta correcta.

Aunque el aprendizaje supervisado constituye el método más empleado, no es el único. Quizás un experto en robótica desconozca lo que debe hacer para enseñar a andar a un robot bípedo; sin embargo, sí puede programar un algoritmo para que el autómata ensaye varias maneras de caminar. Si tras probar con uno de ellos, el robot acaba en el suelo, aprenderá que ese no es el modo correcto de conseguirlo.

Dicho proceso se conoce con el nombre de aprendizaje por refuerzo. En esencia se trata de una estrategia de ensayo y error, bien conocida por todos nosotros. Existen numerosas situaciones en las que nos vemos obligados a actuar, pero, en lugar de esperar a que alguien nos indique lo que debemos hacer, probamos una determinada acción y observamos el resultado. En función de nuestro éxito, de cara al futuro reforzaremos las opciones correctas y evitaremos las erróneas. En último término, tanto personas como máquinas aprenden a tomar la decisión adecuada a cada situación.

Un ejemplo lo hallamos en los motores de búsqueda en Internet. Allá por 1997, los fundadores de Google no invirtieron horas y horas explorando la Red para después enseñar a su algoritmo a reconocer páginas relacionadas con contenidos como «oveja Dolly». En su lugar, el motor pulula por la Red para generar un primer borrador de resultados; después, emplea el número de clics de los usuarios como indicador de refuerzo acerca de las páginas relevantes. Cuando alguien abre un enlace, el algoritmo aprende que esa página guarda relación con la búsqueda; en cambio, si todo el mundo ignora uno de los enlaces que encabezan la lista de resultados, el motor deduce que se trata de una página irrelevante. De esta manera, las reacciones de millones de usuarios permiten al algoritmo afinar los criterios de búsqueda a la hora de evaluar la relevancia de las distintas páginas.

EXCESO DE POTENCIA

El aprendizaje por refuerzo se emplea a menudo para tareas que requieren una secuencia de acciones, como los juegos. Consideremos el caso de las tres en raya. Tal vez el computador comience al azar situando una X en una esquina. Con el tiempo, comprobará que gana esas partidas con mayor frecuencia que cuando empieza colocando la X en un lateral. Así, la acción que conduce a la victoria (la X en la esquina) se verá reforzada. Ese proceso puede extenderse a otras fases de la partida y, también, a cualquier otro juego, como las damas o el *go*, el juego de estrategia de origen oriental. Las técnicas de aprendizaje por refuerzo se han empleado asimismo en tareas económicas complejas, como aquellas que requieren encontrar un equilibrio de Nash.

Sin embargo, existen situaciones en que el resultado de las acciones no puede evaluarse ni directa ni indirectamente. En tales casos no podremos aplicar el aprendizaje por refuerzo, sino que deberemos recurrir al aprendizaje no supervisado. Esta técnica se emplea en aquellos casos en los que los investigadores disponen de un gran volumen de datos, pero ignoran qué hacer con ellos, ya que no disponen de información explícita (como ocurre en el aprendizaje supervisado) ni implícita (como en el aprendizaje por refuerzo) sobre las acciones que deben tomarse. ¿Cómo proceder, entonces? Un primer paso puede consistir en asignar categorías a los datos a partir de las semejanzas que existen entre ellos. En este procedimiento, conocido como agrupamiento (*clustering*), se analizan datos sin catalogar y se extrae información acerca de su estructura. Ello permite entenderlos mejor antes de decidir qué acción tomar. En ocasiones, un agrupamiento adecuado puede bastar por sí solo: si deseamos organizar una biblioteca, no necesitaremos más que ordenar los libros en categorías similares. Otras veces puede ser necesario ir más allá y aplicar a los datos agrupados un aprendizaje supervisado.

Irónicamente, la mayor trampa del aprendizaje automático proviene de aplicar demasiada potencia de cálculo. De hecho,

una de las cualidades que distingue entre los profesionales de la disciplina y los aficionados reside justamente en la capacidad de utilizar los recursos necesarios sin extralimitarse. Pero ¿cómo podría resultar perjudicial un exceso de potencia? Los algoritmos de aprendizaje intentan detectar pautas regulares en los datos. Sin embargo, un algoritmo demasiado «hostil» (porque, pongamos por caso, emplea un método excesivamente rebuscado para ajustar un conjunto de datos simples) tal vez acabe identificando patrones ficticios que solo se deben a la casualidad. Una parte considerable de la teoría matemática del aprendizaje automatizado se centra precisamente en resolver estos problemas de «sobreajuste» de datos. Nuestro objetivo consiste en identificar relaciones genuinas, no crear pautas espurias.

A modo de ejemplo, pensemos en un aficionado a la ruleta que observa diez tiradas consecutivas y comprueba que estas se alternan de manera sistemática entre el rojo y el negro. En vista de ello, deduce que la ruleta está trucada, genera un modelo mental que se ajusta a la perfección a los datos disponibles («rojo, negro, rojo, negro, rojo, negro...») y apuesta cien fichas al rojo. Pero, en la undécima tirada, el carácter errático de la rueda regresa y la bola se detiene en negro.

Nuestro jugador ha perdido todo su dinero solo por empeñarse en ver un patrón donde, en realidad, no había ninguno. La estadística nos dice que la probabilidad de que la ruleta pase del rojo al negro diez veces seguidas asciende aproximadamente a 1 entre 500. Sin embargo, cada jugada resulta completamente independiente de las anteriores, por lo que la probabilidad de obtener un color u otro es siempre igual al 50 por ciento. No en vano, una antigua máxima del aprendizaje automatizado reza como sigue: si torturas los datos el tiempo suficiente, acabarán confesando.

Para evitar problemas semejantes, los programadores intentan emplear los algoritmos más sencillos posible valiéndose de una técnica llamada regularización. En general, cuanto más complejo sea un modelo, mayor será su propensión a sobreajustar los datos, por lo que la regularización intenta mantener esa complejidad bajo control.

Además, la validación del algoritmo suele apoyarse también en datos ajenos a aquellos empleados durante el proceso de adiestramiento. Esto sirve para asegurar que el comportamiento resultante es genuino y no un mero artificio de los datos de entrenamiento. En el concurso de Netflix, por ejemplo, los algoritmos no fueron puestos a prueba con el conjunto de datos original, sino con un nuevo bloque de datos que solo conocían los miembros de la compañía.

PREDECIR EL FUTURO

Resulta difícil aburrirse trabajando en aprendizaje automatizado. Esta disciplina permite que un lego en cierta materia (como un ignorante en moda femenina, por ejemplo) prediga tendencias futuras basándose únicamente en un conjunto de datos informáticos. En la actualidad, el interés por el tema ha explotado. El año pasado, estudiantes de 15 especialidades asistieron a un curso que impartí en el Instituto de Tecnología de California. Por vez primera, colgué en Internet el material del curso y los vídeos de las clases. Miles de personas en todo el mundo las siguieron y realizaron las tareas correspondientes. (El lector interesado también podrá hacerlo si acude al enlace que figura en el apartado «Para saber más».)

Con todo, no debemos olvidar que el aprendizaje automatizado solo funciona con problemas para los que disponemos de un volumen suficiente de datos. La técnica no genera información, sino que la extrae a partir de los datos disponibles. Si estos no bastan para entrenar a la máquina, el aprendizaje automatizado no funcionará. Sin embargo, el acceso a grandes cantidades de datos es, cada vez más, moneda común en numerosos campos. Sin duda, ello augura un futuro brillante para esta disciplina. Créame: realizar predicciones es mi especialidad.

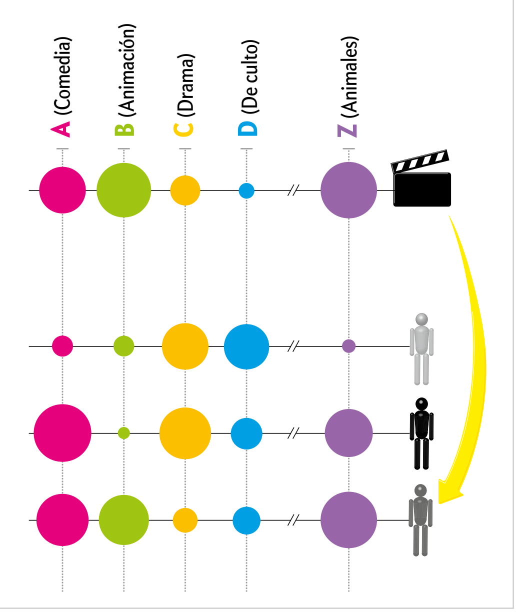
ASÍ FUNCIONA

Clasificada X, Y o Z

¿Qué película desea ver esta noche? Los motores de recomendación personalizada emplean algoritmos de aprendizaje automático para «deducir» los gustos de un espectador y ayudarle a encontrar, de entre todo el océano de posibilidades, un título de su agrado. Dichos programas se basan en una técnica denominada descomposición en valores singulares, la cual desglosa una película en largas listas de atributos y los empareja con las preferencias del espectador. El método puede extenderse a casi cualquier sistema de recomendación, como los motores de búsqueda en Internet o las agencias de contactos.

Convertir películas en datos
La computadora comienza con una base de datos de películas y puntuaciones ya asignadas por los espectadores. Después, emplea las calificaciones colectivas para desglosar cada filme en largas listas de atributos. Estos quizá correspondan a categorías como «comedia» o «de culto», pero tal vez no. En cualquier caso, para el ordenador solo serán atributos abstractos, como X, Y o Z.

Emparejar espectadores y títulos
Por último, se descodifican las preferencias de los espectadores y se intenta asignar a cada uno la película más adecuada a sus gustos. Si en el pasado un sujeto ha mostrado predilección por ciertas combinaciones de atributos, se le recomendarán películas similares.



JEN CHRISTIANSEN

PARA SABER MÁS

Adiestramiento de las máquinas. Yaser S. Abu-Mostafa en *Investigación y Ciencia*, n.º 225, junio de 1995.

Recommend a movie, win a million bucks. Joseph Sill en *Engineering & Science*, vol. 73, n.º 2, págs. 32-39, primavera de 2010.

Learning from data. Yaser S. Abu-Mostafa, Malik Magdon-Ismail y Hsuan-Tien Lin. AMLbook, 2012. **amlbook.com**

Learning from data (curso en línea del autor): **work.caltech.edu/telecourse.html**

Enrique Doblas Miranda, investigador del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales, es doctor en biología por la Universidad de Granada. En la actualidad su trabajo se centra en la coordinación científica de proyectos relacionados con la influencia del cambio global sobre el bosque, entre ellos, el de MONTES Consolider.



ECOLOGÍA

El bosque mediterráneo ante el cambio global

Las alteraciones ambientales que experimenta nuestro planeta afectan a las comunidades forestales, pero estas también responden e interactúan con los factores del cambio global

Enrique Doblas Miranda

El sol seca sin compasión el suelo y las plantas que se aferran a él en las laderas del Parque Natural del Garraf, en Cataluña. Curiosamente, todos los arbustos de la zona soportan por igual la escasez de agua, incluso los que se hallan sometidos a un esfuerzo extraordinario. Marc Estiarte, del Centro de Investigación Ecológica y Aplicaciones Forestales (CREAF), lleva años investigando la resistencia de las plantas a la sequía a través de un simple mecanismo de privación de lluvia en un área de estudio dentro de este matorral costero mediterráneo. Realiza el experimento con coronillas, brezos de invierno, romero y lentiscos. Sin embargo, hasta ahora el crecimiento de las plantas desprovistas de agua no parece verse tan afectado como se esperaba, en comparación con el de las que sí reciben la escasa lluvia. También en el Parque Nacional de Doñana, en Andalucía, recientes observaciones realizadas por investigadores del CREAF señalan la poderosa capacidad de regeneración de las comunidades arbustivas tras eventos de mortandad provocados por la sequía de 2007. Las plantas mediterráneas parecen, pues, evolutivamente preparadas para resistir condiciones climatológicas extremas... aunque no de forma ilimitada.

EN SÍNTESIS

Los ecosistemas mediterráneos presentan estrategias que les permiten reaccionar ante los diversos factores del cambio global, como el ascenso de la temperatura, los incendios forestales, las invasiones biológicas o la contaminación atmosférica.

Pero, a su vez, poseen la capacidad de modificar esos elementos de cambio. De forma local o regional, influyen en la composición atmosférica y el clima, la disponibilidad de agua para las plantas y el abastecimiento humano, así como en el riesgo de incendios forestales y las invasiones biológicas.

Las reacciones del ecosistema ante los factores de cambio global complican el estudio y comprensión de dicho cambio. Sin embargo, el conocimiento de las estrategias de resistencia y resiliencia del bosque mediterráneo, y la aplicación de estas en la gestión forestal, supone la mejor manera de enfrentarse a él.

LUCÍA GALIANO Y ALBERT RIVAS



El Mediterráneo es uno de los puntos del planeta donde el clima está cambiando de manera más pronunciada. Se predice que las temperaturas ascenderán entre 3 y 5 ºC en la península ibérica, especialmente las estivales, pero también aumentará la variabilidad entre años, lo que conllevará un mayor riesgo de olas de calor. Se espera también un descenso de hasta el 30 por ciento de la precipitación, acompañado por una mayor frecuencia de sequías veraniegas. Sin embargo, en otras estaciones pueden aumentar los eventos de precipitación extrema.

Se sabe que el cambio climático está modificando la estructura y el funcionamiento de los ecosistemas. Está provocando una disminución del crecimiento de los árboles y una defoliación de sus copas, y está alterando los flujos de agua y carbono, la fenología de plantas y animales, e incluso procesos clave del suelo, como la descomposición de la materia orgánica. Pero también se ha observado el efecto contrario: los ecosistemas alteran el clima a escala local y regional, o simplemente resisten mejor de lo que se creía al progresivo aumento de la temperatura y a las irregularidades en la precipitación.

Tal respuesta no solo ocurre en relación al cambio climático, sino también frente a otros componentes del cambio global. Este se entiende como el conjunto de alteraciones ambientales que se derivan de las actividades humanas y que afectan al funcionamiento del planeta. Así, numerosos ecosistemas han desarrollado estrategias para responder a los incendios forestales, a las invasiones biológicas, a la contaminación atmosférica o incluso a prácticas de gestión agresivas, con lo que logran regenerarse cuando cesan dichas perturbaciones. Los ecosistemas mediterráneos, adaptados por razones históricas, evolutivas y ecológicas a condiciones extremas de variación climática, fuego o manipulación, ofrecen un claro ejemplo de capacidad de respuesta ante el cambio global, a la vez que influyen sobre él.

Pero a pesar de la enorme resistencia y resiliencia (capacidad de recuperación) de los ecosistemas mediterráneos al cambio global, deben tenerse en cuenta varios aspectos. Sometidos a condiciones ambientales por encima del límite de respuesta, estos sistemas, por su situación intermedia entre el desierto del Sáhara y los bosques templados de Europa, tienden a convertirse en otros propios de climas más áridos (principalmente, comunidades arbustivas de escasa cobertura vegetal) desde los cuales resulta muy difícil regresar a la situación inicial [*véase* «Ecosistemas al borde del colapso», por Carl Zimmer; Investigación y Ciencia, diciembre de 2012]. Ello tiene importantes repercusiones en la gestión y la conservación: resultará menos costoso, desde un punto de vista ecológico y económico, promover la propia respuesta de los ecosistemas mediterráneos ante los cambios ambientales para prevenir su transformación, que revertir el proceso de desertificación una vez haya tenido lugar. La capacidad de supervivencia innata de estas comunidades nos puede enseñar las claves para enfrentarnos como sociedad al cambio global, pero también podría tornarse en la prueba más dura de nuestro fracaso.

EL PAPEL MODULADOR DEL BOSQUE

Como ya se ha mencionado, las plantas mediterráneas cuentan con ciertas ventajas evolutivas que las hacen resistentes a los períodos de sequía. Los árboles y arbustos presentan hojas coriáceas y perennes para reducir la pérdida de agua, mientras que las herbáceas poseen la capacidad de regenerarse a través de los bancos de semillas almacenados en el suelo.

Pero la resistencia o la resiliencia no constituyen los únicos mecanismos de defensa de los ecosistemas forestales ante



MARC ESTIARTE, CREAF

Estación experimental en el Parque Natural del Garraf, donde investigadores del CREAF estudian la resistencia de las plantas mediterráneas a la sequía. Para ello les privan del agua de lluvia por medio de techados (dentro de las parcelas delimitadas en forma de rectángulo que se aprecian en la imagen) y las comparan con otras que sí la reciben.

Pese a la devastación provocada por el incendio, el sotobosque mediterráneo se regenera con rapidez. La imagen corresponde a una zona de Horta de Sant Joan (Tarragona), un año después del fuego.



el cambio global. Los bosques absorben y acumulan dióxido de carbono (CO_2), ozono y otros compuestos presentes en la atmósfera que contribuyen al efecto invernadero, con lo que atenúan a escala global el cambio climático. No obstante, Josep Peñuelas, miembro del CSIC y director de la Unidad de Ecología Global del CREAF, y Alex Guenther, del Centro Nacional de Investigación Atmosférica de los EE.UU., entre otros investigadores, han demostrado que también emiten compuestos orgánicos volátiles que, al transformarse en ozono y aerosoles, favorecen el efecto invernadero. Pese a la idea tan socialmente difundida y aceptada de que tener más árboles conlleva una reducción de los compuestos responsables del calentamiento del planeta, no siempre ocurre así.

Por otra parte, la cubierta vegetal contribuye a aumentar el albedo (la parte de la radiación solar incidente reflejada por la Tierra), con lo que hace disminuir la temperatura de la superficie terrestre y atenúa de nuevo el calentamiento global. Sin embargo, el efecto no es uniforme en todo el planeta. La ola de calor de 2003 en Europa demostró que la existencia de una mayor cobertura vegetal en la región mediterránea generaba el efecto contrario debido al fenómeno de la evapotranspiración (la pérdida de humedad debida a la evaporación de agua del suelo y la transpiración de las plantas). Al reducir la vegetación la cantidad de agua almacenada en el suelo, este pierde la capacidad de enfriamiento y aumenta la temperatura de su superficie, lo que empeora las consecuencias de esos fenómenos climatológicos extremos.

De hecho, las masas forestales intervienen de modo determinante en el ciclo del agua. Al absorberla en grandes cantidades, evitan que llegue a los ríos y embalses de los que nos abastecemos. A su vez, la devuelven a la atmósfera mediante la evapotranspiración, con lo que vuelven a ponerla en circulación. En los ecosistemas mediterráneos, donde el agua es un factor limitante, contar con extensas masas forestales en las cuencas podría poner en peligro el abastecimiento de agua para consumo humano en épocas de sequía.

Por otro lado, las masas boscosas conllevan beneficios ambientales indudables frente al cambio climático. Se predice que cada vez habrá más acontecimientos de precipitación extremos y que los bosques resultarán fundamentales para mitigar la erosión provocada por tales eventos y para evitar inundaciones.

En la región mediterránea habría que considerar con mucho cuidado el balance entre las consecuencias positivas y las negativas de una extensa cubierta vegetal. En las zonas más húmedas de la región, principalmente en la parte septentrional, los bosques absorben más compuestos atmosféricos implicados en el efecto invernadero de los que emiten y los mecanismos de disminución de temperatura compensan a los que la aumentan. Pero en las zonas más secas, sobre todo en la parte meridional, sucede lo contrario y además el agua constituye un bien demasiado preciado. En este último caso, nuestra respuesta más inteligente ante el cambio climático debería basarse en una gestión de las masas forestales orientada al ciclo del agua, más que a los cambios en la composición atmosférica [*véase* «Bosques y cambio climático», por Carlos Gracia; Investigación y Ciencia, julio de 2011].

En resumen, contar con más árboles no siempre conlleva ventajas. En las regiones áridas como la mediterránea, los bosques absorben pocos gases de efecto invernadero, reducen el abastecimiento de agua humano e incluso podrían suponer un aumento importante del riesgo de incendio.

INCENDIOS FORESTALES

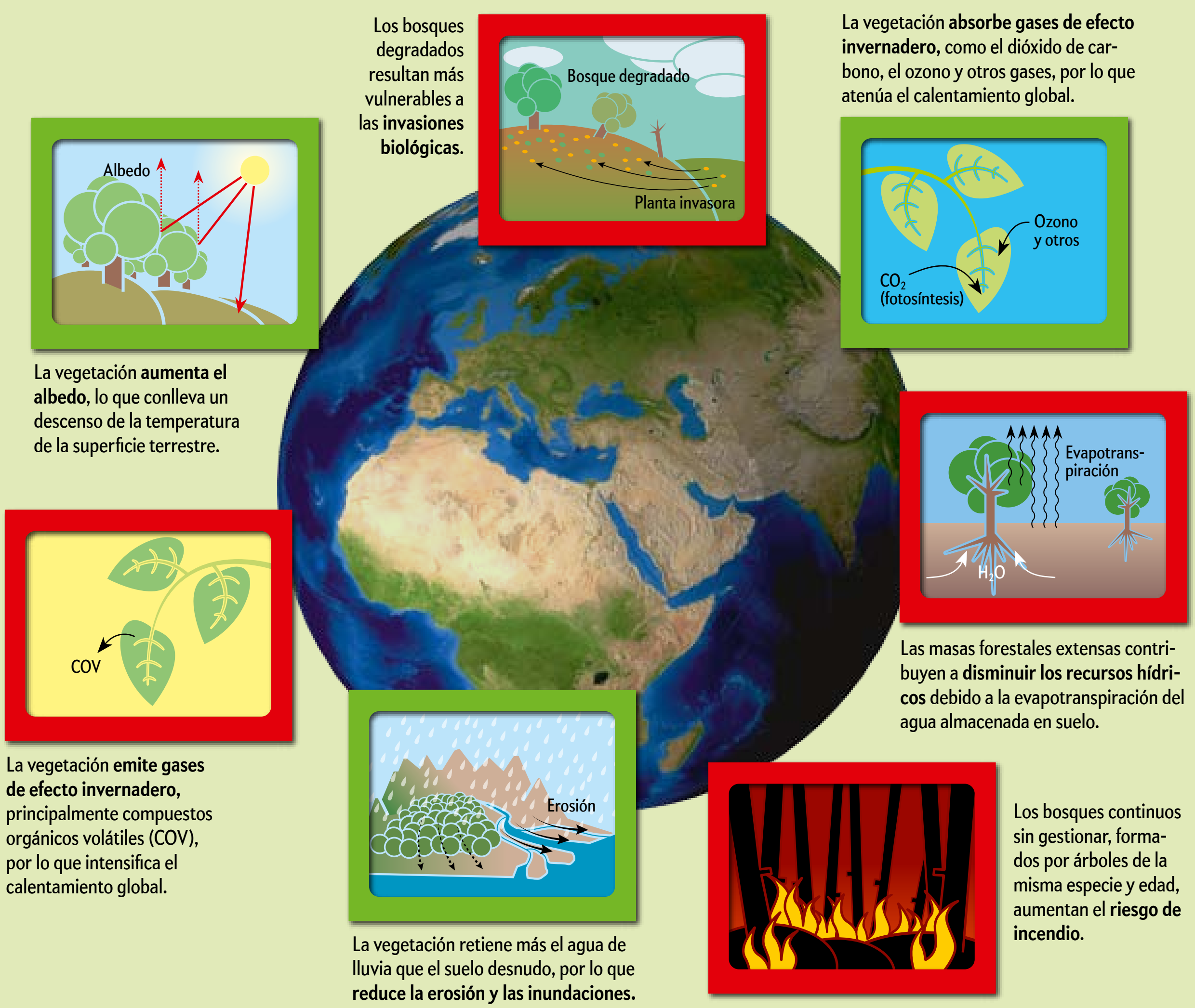
Muchos de los ecosistemas mediterráneos son típicamente resistentes al fuego y tienen la capacidad de regenerarse, con más o menos vigor, tras el paso de las llamas. Lo hacen sobre todo a través del rebrote de órganos subterráneos o de la germinación de semillas almacenadas en el suelo. Incluso numerosas plantas se sirven del fuego para propagarse. Se trata de las especies serótinas, como el pino carrasco o el marítimo, cuyas semillas solo son dispersadas cuando el fruto es expuesto a las altas temperaturas de un incendio [*véase* «Fuego y evolución en el Mediterráneo», por J. G. Pausas; Investigación y Ciencia, agosto de 2010].

Pero además de su resiliencia innata ante los incendios, el bosque mediterráneo posee una gran capacidad dispersiva de semillas gracias a la fauna que lo habita. Así, aunque ciertas especies vegetales no se hallen en el banco de semillas superviviente, animales como el arrendajo pueden ayudar a su recolonización en los territorios quemados desde las zonas adyacentes no afectadas. Es más, las aves no solo contribuyen activamente a la recuperación del bosque, sino que existen especies adaptadas al aprovechamiento de los nuevos terrenos originados tras los incendios.

No obstante, el intenso régimen actual de incendios está menoscabando ese poder de recuperación, y las previsiones en el marco del cambio climático no resultan nada esperanzadoras. Si bien el número y la extensión de los incendios han disminuido en la región mediterránea desde la implantación de los sistemas de detección y prevención, estos tienen sus limitaciones. De hecho, se prevé que los efectos del cambio climático darán lugar a un aumento del riesgo de incendios ante los cuales no bastarán los medios existentes, como tristemente se demostró el pasado verano en muchos puntos de España (en León y Gerona se superaron las 10.000 hectáreas afectadas y en Valencia pasaron de 60.000). Incluso un bosque «a prueba de incendios» puede terminar perdiendo su capacidad de regeneración debido a un régimen demasiado intenso de fuegos o a la dese-

Los bosques resisten y modulan el cambio

La contaminación atmosférica, el calentamiento del planeta, los incendios forestales, los cambios de uso del suelo y las invasiones biológicas alteran los bosques mediterráneos. Pero estos, además de exhibir una enorme resistencia y capacidad de respuesta, poseen a su vez la capacidad de modular estos factores del cambio global. Unas veces lo atenúan (*verde*), otras lo exacerban (*rojo*). Que esos mecanismos operen en un sentido u otro viene en gran medida determinado por las características del ecosistema de partida, sobre todo, de la estructura y densidad de la vegetación, que, a su vez, dependen en gran parte del clima y la historia de usos de suelo.



cación del banco de semillas, en especial cuando esas catástrofes se combinan con posteriores sequías.

Si ascendemos de escala hasta el nivel de paisaje, el mosaico rural tradicional de la región mediterránea constituye una de las mejores defensas contra los incendios forestales. La heterogeneidad y discontinuidad del paisaje creadas por distintos usos de suelo, entre ellos, diversos tipos de bosques, comunidades arbustivas y cultivos, dificultan la propagación del fuego y ayudan a controlarlo. Francisco Lloret, profesor de la Universidad Autónoma de Barcelona e investigador del CREAF, y otros expertos han señalado en repetidas ocasiones el modo en que los grandes incendios forestales se ven facilitados por la conectividad y homogeneidad del paisaje. Las grandes masas forestales sin roturar o los bosques monoespecíficos de una sola generación, como los originados tras la deforestación por talas o incendios, tienden a ser agrupados y frondosos, lo que facilita el contagio de las llamas. De hecho, los grandes eventos de fuego, de no gestionar apropiadamente el terreno tras la perturbación, generan a medio plazo un bosque continuo y con árboles de edad similar, lo que alienta la repetición del incendio en el futuro.

Actualmente, se tiende a gestionar el bosque tratando de acelerar su recuperación a corto plazo. Esta no parece una estrategia adecuada, porque con el tiempo suele generar bosques densos y monoespecíficos, más propensos a sufrir plagas e incendios. En cambio, el respeto de los ciclos naturales de regeneración, a más largo plazo, fortalece la resistencia natural del ecosistema forestal a nuevas perturbaciones. Así era como los

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

usos de suelo tradicionales de la cuenca mediterránea (como la saca de madera o el pastoreo) contribuían en el pasado a la resistencia de los bosques al fuego.



La regeneración natural después de una perturbación o el abandono de tierras da lugar a la formación de los nuevos bosques, a menudo con una elevada densidad de árboles de la misma especie y edad. De no gestionarse adecuadamente esas masas, generan graves problemas ecológicos, como un mayor riesgo de incendio, plagas o invasiones biológicas.

JAVIER LOSARCOS

LOS «NUEVOS BOSQUES»

Existe una larga tradición de utilizar los bosques mediterráneos como proveedores de recursos. Ello explicaría en parte su mayor resistencia ante los actuales ritmos de deforestación en comparación con la de ecosistemas de otras partes del globo.

El lento crecimiento de los árboles y las dificultades de extracción de la madera en la región mediterránea hacen que el uso maderero no resulte competitivo frente al de las formaciones boscosas del norte de Europa o de países tropicales. En cambio, otros aprovechamientos tradicionales promueven el mantenimiento de paisajes con una mayor capacidad de respuesta ante las condiciones adversas. Las dehesas, por ejemplo, no solo proveen de alimento al ganado bovino y porcino, sino que mantienen una sabana en la que la escasa competencia arbórea favorece la resistencia a la sequía. Igualmente, la saca de ramaje para su uso como combustible o el consumo de brotes arbustivos por parte del ganado ovino impiden el desarrollo de las condiciones ideales para la propagación de los incendios.

Por desgracia, esas prácticas tradicionales beneficiosas para el bosque se han ido abandonando progresivamente debido al despoblamiento rural. Ello ha favorecido la formación de «nuevos bosques» en terrenos antiguamente explotados para la agricultura o el pastoreo. Así, en la península ibérica el éxodo rural ha supuesto un aumento del 30 por ciento de la masa forestal en las últimas décadas, mientras que la explotación y los incendios la han mermado en un 1 por ciento.

Uno de los factores clave en la respuesta de los bosques ante el cambio global y del que se posee un escaso conocimiento corresponde al uso del suelo en el pasado. Dos bosques de apariencia semejante pero con un uso histórico del suelo distinto podrían responder de modo diferente ante un episodio de sequía, una gestión intensiva u otra perturbación, o incluso ante cualquier tendencia (como el incremento anual de temperatura). Lluís Brotons, investigador del Centro Tecnológico Forestal de Cataluña (CTFC), se interesa desde hace tiempo por el valor verdadero de los nuevos bosques según los cambios de uso del suelo que experimentaron esas zonas en el pasado. Él y su equipo han demostrado que los ecosistemas más estables, que más tiempo llevan siendo bosque, se recuperan mejor y más rápido tras un incendio que los bosques más jóvenes, como los desarrollados sobre un terreno de cultivo abandonado. Después de una perturbación, la regeneración de un ecosistema o su transformación en otro con menos plantas, propio de condiciones más áridas, puede depender, por tanto, de la trayectoria histórica de usos del suelo.

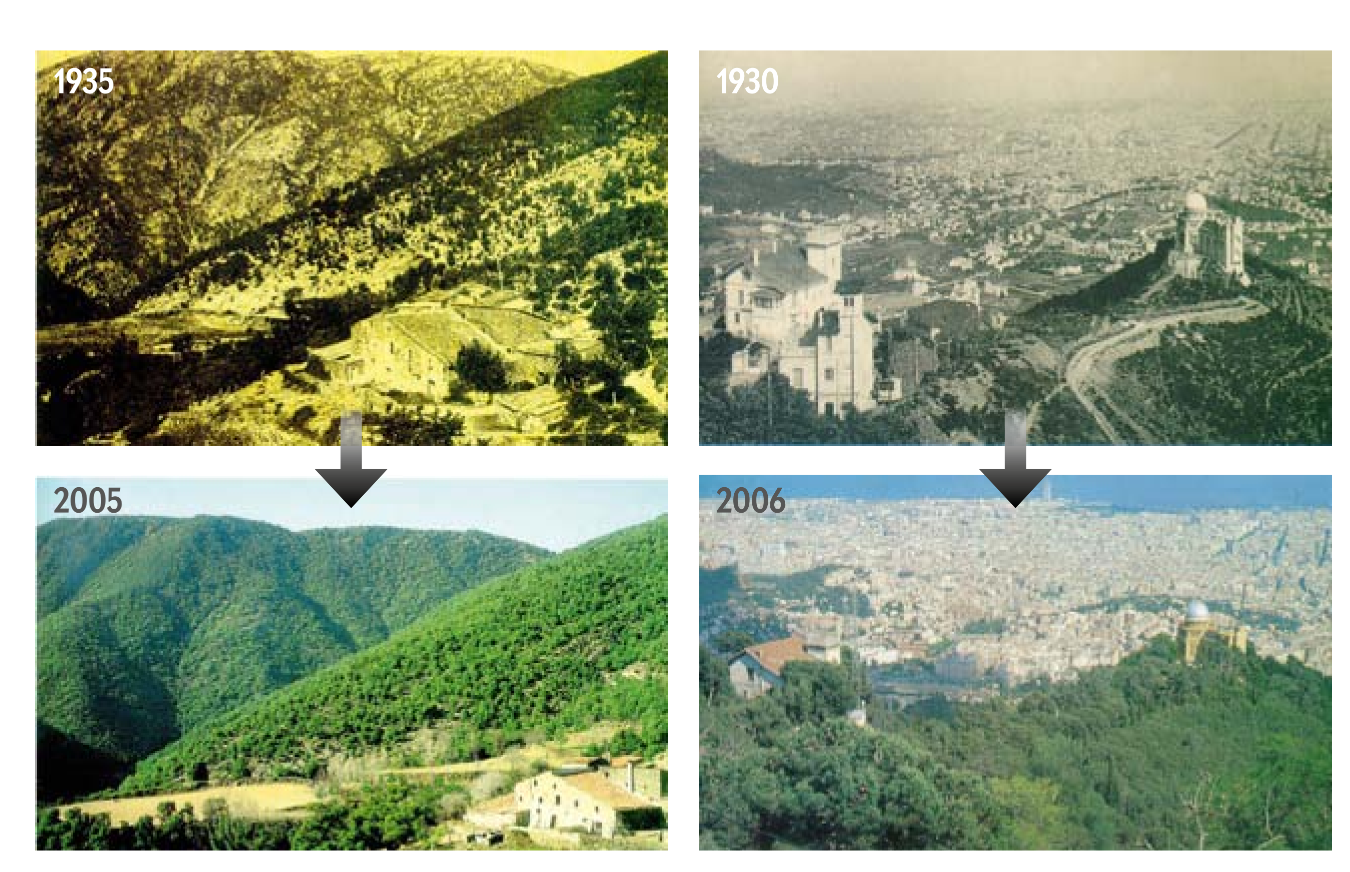
Los nuevos bosques contribuyen a la merma de los recursos hídricos para el consumo humano y, además, aumentan la conexión entre masas forestales ya existentes, lo que supone un mayor riesgo de incendio a gran escala. Asimismo, esas masas forestales suelen crecer sin que se les aplique una gestión apropiada, de manera que acumulan materia seca y un dosel arbustivo muy propensos a quemarse, se vuelven vulnerables a invasiones biológicas o sucumben ante plagas antes controladas por la mano del hombre.

INVASIONES BIOLÓGICAS

Los procesos de invasión biológica son complejos y dependen no solo de las características de las especies foráneas, sino también de las propiedades del ecosistema receptor, así como de otros factores relacionados con el propio evento de invasión [*véase* «Especies invasoras», por R. Barbault y A. Teyssèdre; Temas de Investigación y Ciencia, julio/septiembre de 2010]. En cualquier caso, los ecosistemas mediterráneos se consideran bastante resistentes a las invasiones debido a sus limitaciones ambientales. Las sequías, los suelos pobres y la presencia de especies muy competitivas, entre otros factores, suelen suponer una desventaja para muchas de las especies exóticas que acceden a ellos.

Curiosamente, pese a esa resistencia natural a las invasiones, los dos factores clave que determinan la entrada de una especie exótica no dependen del tipo de ecosistema en sí. Se trata del tránsito de personas y mercancías y del grado de perturbación del ecosistema. Ambos factores pueden ser gestionados para su control. Montserrat Vilà, investigadora del CSIC en la Estación Biológica de Doñana, y sus colaboradores en ese centro y en el CREAF llevan mucho tiempo revelando los procesos de invasión en los ecosistemas españoles mediterráneos y en toda Europa, pero también dedican importantes esfuerzos a la labor política, social, divulgativa y educativa necesaria para evitar la contribución humana a esos procesos. Entre otras medidas, han elaborado listas de especies foráneas consideradas de alto riesgo de invasión que son consultadas por aduanas y gestores forestales; también han mejorado los protocolos de respuesta ante distintos grados de invasiones vegetales y animales.

Por otro lado, las perturbaciones como el fuego o una gestión intensiva contribuyen a la introducción de especies foráneas. La apertura de nuevos nichos ecológicos es aprovechada por tales especies, algunas de las cuales se convierten en invasoras. Las nutritivas cenizas que restan tras un incendio o incluso la deposición de nitrógeno procedente de la contaminación atmosférica crean las condiciones ideales para ciertas plantas necesitadas de mayores concentraciones de nutrientes (principalmente, herbáceas anuales, como la avena silvestre) que aprovechan esa «ventana de oportunidad» para establecerse. Actualmente, algunos científicos del CREAF investigan si esas poblaciones pioneras suponen verdaderamente un riesgo para el ecosistema o si, por el contrario, a medida que este se va recuperando, van siendo desplazadas por las plantas autóctonas, mejor adaptadas a la escasez de nutrientes.



Desde mediados del siglo XX, **el abandono progresivo de los cultivos y de las prácticas tradicionales de explotación de los recursos forestales ha dado lugar a la regeneración incontrolada de la vegetación. Sin una gestión adecuada, estos «nuevos bosques» presentan un elevado riesgo de incendios, invasiones biológicas y plagas. En las imágenes, se aprecia la reforestación natural que han experimentado a lo largo del pasado siglo dos zonas del Parque Natural de Collserola, en Barcelona.**

EL CONOCIMIENTO APLICADO A LA GESTIÓN

Las reacciones de los ecosistemas ante los factores de cambio global aumentan la complejidad existente a la hora de estudiar y comprender dicho cambio. Sin embargo, el conocimiento de las estrategias de supervivencia, resistencia y resiliencia que manifiesta el bosque mediterráneo ante el cambio global nos proporciona una base para enfrentarnos a él, ya que podemos aplicar o favorecer esas estrategias a través de una gestión forestal adecuada.

Carlos Gracia y su equipo de la Universidad de Barcelona han demostrado la posibilidad de predecir, gracias al modelo GOTILWA, medidas de gestión apropiadas para mantener el balance idóneo entre los flujos de agua y dióxido de carbono en los ecosistemas mediterráneos. Teniendo en cuenta la alta competitividad de los árboles por el agua y otros recursos, así como el elevado riesgo de incendio en un bosque demasiado denso, estos investigadores han comprobado que, en los encinares, una de las mejores medidas de gestión corresponde al clareo (la eliminación de una parte de la vegetación o de su ramaje). En esta misma línea, José Ramón González Olabarria, ingeniero del CTFC, ha señalado que la tala selectiva planeada, con la retirada de árboles de ciertas características, puede resultar beneficiosa no solo como manejo preventivo contra los incendios, sino también para el aprovechamiento económico de la madera.

Esas son solo dos ideas aplicadas entre las muchas que surgen tras el estudio de las interacciones entre los factores de cambio global y los montes mediterráneos (bosques, matorrales, prados). Existe un empeño y esfuerzo por parte de la comunidad científica en que los resultados de estas investigaciones se transfieran a la gestión de nuestros bosques. Proyectos como MONTES-Consolider (al cual pertenecen la mayoría de los investigadores nombrados en el presente artículo), así lo demuestran. Pero las intenciones no son suficientes. Desde los altos cargos políticos que toman las decisiones hasta los ciudadanos que con su voz pueden protestar o aplaudir esas acciones, todos debemos comprender que para conservar el bosque ante el cambio global este ha de ser gestionado. Los propietarios, gestores y empresas forestales necesitan recursos e impulso para adaptarse y promover la respuesta natural de los ecosistemas mediterráneos al cambio global; en los casos en que la capacidad de respuesta se ha perdido, para recuperarla, y en los que se mantiene, para protegerla. Como se sugería al principio del artículo, tenemos ante nosotros un reto importante: el de ayudar a superar la prueba más dura a la que se enfrenta la región mediterránea.

PARA SABER MÁS

Novel ecosystems: theoretical and management aspects of the new ecological world order. R. J. Hobbs et al. en *Global Ecology and Biogeography*, vol. 15, págs. 1-7, 2006.
Phenology feedbacks on climate change. Josep Peñuelas et al. en *Science*, vol. 324, págs. 887-888, mayo de 2009.
Water for Forests and People in the Mediterranean Region. Dirigido por Yves Birot, Carlos Gracia y Marc Palahí. European Forest Institute, 2011.
Fire in mediterranean ecosystems: Ecology, evolution and management. Jon E. Keeley et al. Cambridge University Press, 2012.
Projecting trends in plant invasions in Europe under different scenarios of future land-use change. M. Chytrý et al. en *Global Ecology and Biogeography*, vol. 21, págs. 75-87, 2012.



MEDICINA

El mito *de los* antioxidantes

Nuevos experimentos contradicen ideas tan veneradas como que el daño oxidativo provoca el envejecimiento o que las vitaminas podrían preservar nuestra juventud

Melinda Wenner Moyer

THOMAS BORN, CORBIS



Melinda Wenner Moyer escribe sobre ciencia y colabora con frecuencia con *Scientific American*. También es profesora en la escuela de posgrado de periodismo de la Universidad municipal de Nueva York.



La vida de David Gems dio un vuelco en 2006 al descubrir un grupo de gusanos que se mantenían con vida en contra de todo pronóstico. Como ayudante del director del Instituto para el Envejecimiento Saludable de la Universidad de Londres, Gems estaba realizando experimentos con *Caenorhabditis elegans*, un nemátodo que suele utilizarse para estudiar la biología del envejecimiento. Deseaba verificar si la acumulación de daños celulares causados por la oxidación (la extracción química de los electrones de una molécula por parte de compuestos muy reactivos, como los radicales libres) era el principal mecanismo responsable del envejecimiento. Según esa teoría, la oxidación descontrolada destruye con el tiempo más y más lípidos, proteínas, fragmentos de ADN y otros componentes cruciales de las células hasta que, en última instancia, se acaban poniendo en peligro los tejidos y órganos y, por tanto, el funcionamiento general del organismo.

Gems creó nemátodos transgénicos carentes de ciertas enzimas que actúan como antioxidantes naturales al desactivar los radicales libres. Esperaba que, en ausencia de antioxidantes, los niveles de radicales libres en los gusanos se dispararían y desencadenarían reacciones oxidativas potencialmente perjudiciales en todo el cuerpo.

Sin embargo, en contra de las expectativas de Gems, los gusanos mutantes no morían de forma prematura. En vez de ello, vivían tanto como los animales normales. El investigador estaba desconcertado. Obviamente, algo había fallado. Le pidió a un colaborador de su laboratorio que comprobase los resultados y repitiese el experimento. Nada cambió. Los gusanos experimentales no producían los antioxidantes; acumulaban radicales libres, como era de esperar, pero no morían jóvenes, a pesar de verse sometidos a un daño oxidativo extremo.

En otros laboratorios de experimentación animal se estaban obteniendo resultados igual de confusos. En Estados Unidos, Arlan Richardson, director del Instituto Barshop de Longevidad y Envejecimiento, de la Universidad de Texas en San Antonio, obtuvo 18 cepas de ratones transgénicos. Algunas producían más cantidad de determinadas enzimas antioxidantes de lo normal, mientras que otras sintetizaban menos. Si los daños provocados por la formación de radicales libres y su posterior oxidación fuesen los responsables del envejecimiento, los ratones que acumulaban más enzimas antioxidantes deberían haber vivido más tiempo que los que carecían de ellas. Sin embargo, «observé esas insólitas curvas de longevidad y no había ninguna diferencia entre ellas», afirma Richardson. Publicó sus desconcertantes resultados en una serie de artículos que aparecieron entre 2001 y 2009.

Mientras tanto, unas pocas puertas más allá del despacho de Richardson, la fisióloga Rochelle Buffenstein se ha pasado los últimos once años tratando de comprender el modo en que el roedor más longevo, la rata topo lampiña (*Heterocephalus glaber*), logra vivir entre 25 y 30 años, unas ocho veces más que un ratón de tamaño similar. Los experimentos de Buffenstein han demostrado que la especie presenta niveles más bajos de antioxidantes naturales que los ratones y acumula más daños oxidativos en sus tejidos a edades más tempranas que otros roedores. Sin embargo, aunque resulte paradójico, vive prácticamente sin enfermedades hasta que mueren a una edad muy avanzada.

Para los partidarios de la vieja teoría del daño oxidativo, esos resultados representaban poco menos que una herejía. Sin embargo, cada vez más dejan de ser una excepción y se están convirtiendo en la norma. En el transcurso de la última década, numerosos experimentos diseñados para respaldar la idea de que los radicales libres y otras moléculas reactivas impulsan el envejecimiento, en realidad, no han hecho más que cuestionarla. Y no solo eso; parece que, en ciertas dosis y situaciones, estas moléculas de alta energía no solo carecerían de riesgo, sino que aportarían beneficios a la salud, ya que pondrían en marcha los mecanismos de defensa intrínsecos que mantienen nuestro cuerpo en plena forma. Además de tener importantes repercusiones en las futuras intervenciones contra el envejecimiento, los hallazgos ponen en entredicho la creencia de que es bueno ingerir grandes dosis de vitaminas antioxidantes. Si

EN SÍNTESIS

Durante décadas se ha creído que los radicales libres, unas moléculas muy reactivas, provocaban el envejecimiento al dañar las células y deteriorar el funcionamiento de tejidos y órganos.

Sin embargo, algunos experimentos recientes demuestran que, en ratones y gusanos, el aumento de ciertos radicales libres se asocia a una vida más larga. De hecho, en determinadas circunstancias, inducirían la puesta en marcha de los sistemas de reparación celular.

De confirmarse esos resultados, ello significaría que la ingesta de antioxidantes en forma de vitaminas u otros tipos de suplemento causa más trastornos que beneficios en individuos que, por lo demás, están sanos.

la teoría del daño oxidativo resulta errónea, entonces el envejecimiento constituye un proceso más complicado de lo que se pensaba. Ello obligará a revisar los conocimientos, a nivel molecular, del envejecimiento saludable.

«El campo del envejecimiento se ha venido basando en un conjunto de paradigmas e ideas que, en cierto modo, parecen haber sido sacados de la manga», afirma Gems. «Tal vez deberíamos considerar otras teorías y tener en cuenta que habrá que mirar la biología desde un punto de vista totalmente nuevo.»

EL ORIGEN DE LA TEORÍA

La idea de que el envejecimiento era provocado por el daño oxidativo, o los radicales libres, fue propuesta por Denham Harman, quien descubrió su verdadera vocación en diciembre de 1945 gracias al *Ladies' Home Journal*. Su mujer, Helen, había llevado a casa un ejemplar de la revista y había señalado un artículo sobre las posibles causas del envejecimiento, que él leyó. Se quedó fascinado.

En aquella época, Harman, químico de 29 años de edad, trabajaba en Shell Development, la filial de la compañía Shell Oil que se dedica a la investigación, y no tuvo mucho tiempo para reflexionar sobre el asunto. Sin embargo, nueve años después, tras graduarse en la facultad de medicina y completar su formación, aceptó un trabajo como ayudante de investigación en la Universidad de California en Berkeley y empezó a considerar más seriamente la ciencia del envejecimiento. Una mañana, mientras estaba sentado en su despacho tuvo una revelación «surgida de la nada», recuerda en una entrevista realizada en 2003: el envejecimiento tenía que estar impulsado por los radicales libres.

Aunque con anterioridad nunca se habían relacionado los radicales libres con el envejecimiento, para Harman esa idea cobraba sentido. Por una parte, sabía que la radiación ionizante de los rayos X y de las bombas radiactivas, que puede resultar mortífera, provocaba la formación de radicales libres en el organismo. Los estudios realizados en aquel tiempo sugerían que las dietas ricas en antioxidantes amortiguaban los efectos perniciosos de la radiación, lo que hacía pensar, como se comprobó después, que los radicales eran los causantes de esos efectos. Además, esas moléculas correspondían a productos secundarios de la respiración y del metabolismo, que, con el tiempo, se acumulaban en el organismo. Dado que tanto los daños celulares como los niveles de radicales li-

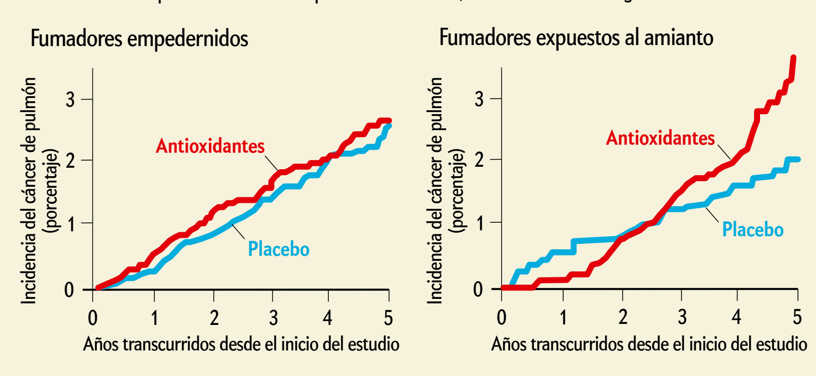
DATOS OBTENIDOS EN HUMANOS

Vitaminas nocivas

Los estudios epidemiológicos demuestran que las personas que ingieren gran cantidad de frutas y verduras, ricas en vitaminas y otros antioxidantes, tienden a vivir más tiempo y son menos propensas a desarrollar cáncer que las personas que no lo hacen. Por tanto, parecería obvio pensar que complementar la dieta con antioxidantes mejoraría la salud. Pero los resultados de los estudios con el diseño más riguroso no apoyan tal suposición. De hecho, los datos demuestran que algunas personas que toman ciertos suplementos tienen una mayor probabilidad de contraer enfermedades potencialmente mortales, como cáncer de pulmón o cardiopatías.

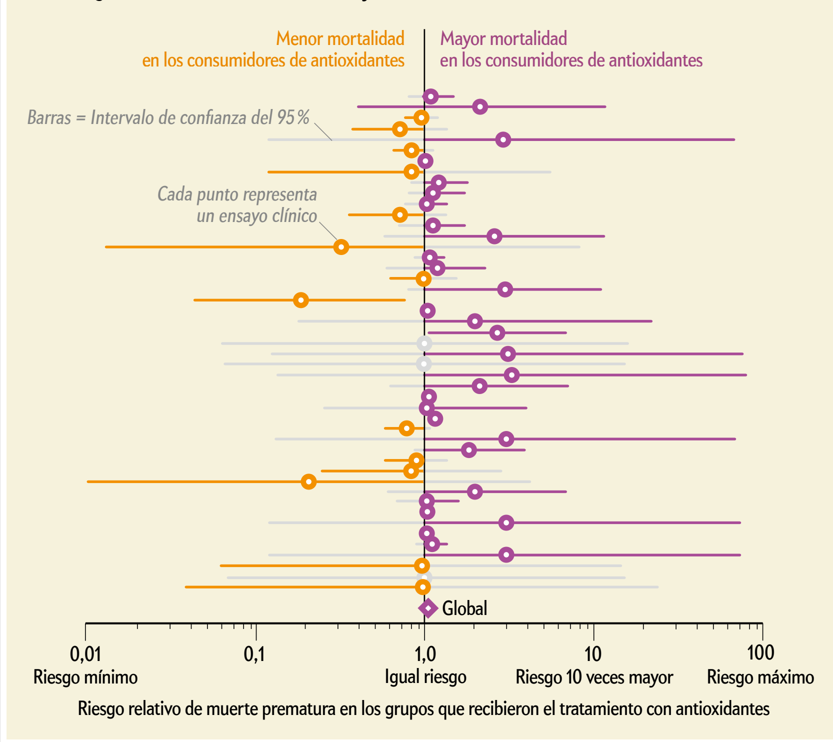
Primeros indicios de que los antioxidantes pueden causar problemas

Un estudio de 1996 realizado con unos 18.000 hombres y mujeres reveló un 28 por ciento más de casos de cáncer de pulmón y un 17 por ciento más de muertes en un grupo al que se había suministrado betacaroteno y retinol que en un grupo al que no se ofrecieron los antioxidantes. El aumento del riesgo se manifestó a los 18 meses, en especial entre los fumadores empedernidos, y fue máximo en los fumadores que habían estado expuestos al amianto, un conocido carcinógeno.



Conclusión: Ingerir algunas vitaminas puede acortar la vida

En 2007, unos investigadores revisaron 68 de los estudios más rigurosos realizados con vitaminas y descubrieron que, al agrupar los datos de los 47 ensayos clínicos con menor sesgo científico, la tasa de muerte prematura aumentaba en un 5 por ciento. Los análisis posteriores relacionaron ese incremento con la ingesta de betacaroteno, vitamina A y vitamina E.



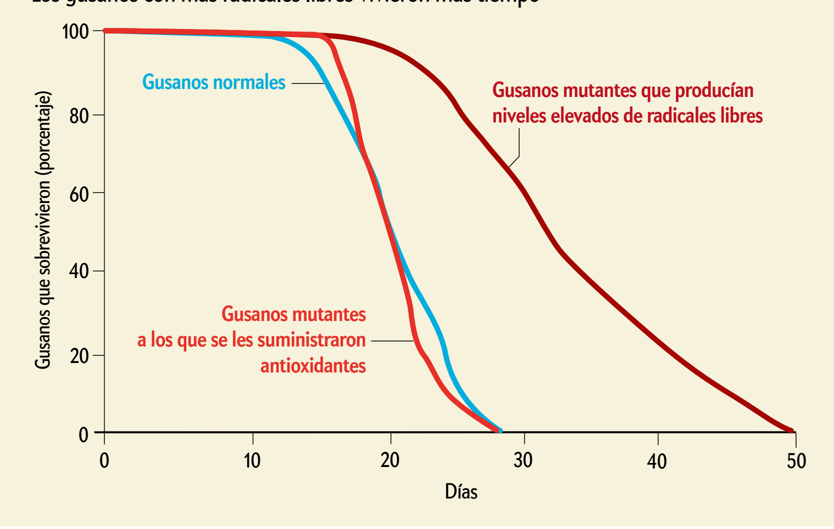
FUENTE: «RISK FACTORS FOR LUNG CANCER AND FOR INTERVENTION EFFECTS IN CARET, THE BETA-CAROTENE AND RETINOL EFFICACY TRIAL», POR GILBERT S. OMENN ET AL. EN *JOURNAL OF THE NATIONAL CANCER INSTITUTE*, VOL. 88, N.º 21, 6 DE NOVIEMBRE DE 1996 (*arriba*); «MORTALITY IN RANDOMIZED TRIALS OF ANTIOXIDANT SUPPLEMENTS FOR PRIMARY AND SECONDARY PREVENTION: SYSTEMATIC REVIEW AND META-ANALYSIS», POR GORAN BJELAKOVIC ET AL. EN *JAMA*, VOL. 297, N.º 8, 28 DE FEBRERO DE 2007 (*abajo*)

DATOS OBTENIDOS EN ANIMALES

Descubrimientos en gusanos mutantes

En lugar de causar envejecimiento (mediante reacciones químicas oxidativas que desencadenan daños celulares), algunos radicales libres podrían resultar beneficiosos. Una posibilidad, respaldada por el trabajo de Siegfried Hekimi y Weng Yang, es que cierto número de radicales induzcan la puesta en marcha de los mecanismos de reparación interna de un organismo. En su experimento realizado con nemátodos publicado en 2010, los investigadores modificaron genéticamente algunos de ellos para que produjesen niveles elevados de ciertos radicales. Para su sorpresa, los gusanos mutantes vivieron más tiempo que los normales. Cuando administraron antioxidantes a los mutantes, el aumento de la longevidad desapareció.





FUENTE: «A MITOCHONDRIAL SUPEROXIDE SIGNAL TRIGGERS INCREASED LONGEVITY IN *CAENORHABDITIS ELEGANS*», POR WEN YNAG Y SIEGFRIED HEKIMI EN *PLOS BIOLOGY*, VOL. 8, N.º 12, DICIEMBRE DE 2010

bres aumentaban con la edad, cabía suponer que estos últimos causaran los daños que daban lugar al envejecimiento, pensó Harman; y los antioxidantes, probablemente, lo ralentizaban.

Harman empezó a verificar su hipótesis. En uno de sus primeros experimentos, alimentó ratones con antioxidantes y demostró que vivían más tiempo. (Aunque, a concentraciones elevadas, los antioxidantes tenían efectos perjudiciales.) En poco tiempo, otros científicos se dispusieron también a comprobarla. En 1969, investigadores de la Universidad Duke descubrieron la primera enzima antioxidante producida por el organismo, la superóxido dismutasa; concluyeron que había aparecido a lo largo de la evolución para contrarrestar los efectos perniciosos de la acumulación de radicales libres. Con esos nuevos datos, la mayoría de los biólogos empezaron a aceptar la idea. «Si trabajas en envejecimiento, la teoría de los radicales libres es como el aire que respiras», afirma Gems. «Es ubicua, se halla en todos los libros de texto. Cada artículo científico parece referirse a ella, directa o indirectamente.»

No obstante, con el tiempo, aparecieron los problemas para reproducir algunos de los descubrimientos experimentales de Harman. En la década de los setenta del siglo xx no había ninguna prueba sólida de que la administración de antioxidantes ejerciese algún efecto sobre la longevidad de los animales, afirma Richardson. Harman supuso que esos experimentos discordantes, que habían sido realizados por otros científicos, sencillamente no se habían controlado muy bien. Quizá los animales no habían podido absorber los antioxidantes que habían ingerido y, por tanto, la concentración total de radicales libres en sangre no había cambiado. Sin embargo, en los años noventa, los avances genéticos permitieron comprobar los efectos de los antioxidantes de forma más precisa. Gracias a las nuevas técnicas, podían manipularse los genomas para alterar la cantidad de enzimas antioxidantes que los animales producían. Una y otra vez, los experimentos de Richardson con ratones transgénicos demostraron que los niveles de radicales libres en el cuerpo de los animales y, por consiguiente, la cantidad de daño oxidativo que debían soportar, no guardaban ninguna relación con la duración de su vida.

En fecha más reciente, Siegfried Hekimi, biólogo de la Universidad McGill, ha creado una estirpe de nemátodos que producen en exceso cierto radical libre denominado superóxido. El investigador pensó que los animales le ayudarían a demostrar la teoría de que el estrés oxidativo provocaba el envejecimiento y pronosticó que los gusanos morirían jóvenes. En vez de ello, en un artículo publicado en 2010 en *PLOS Biology*, reveló que los gusanos transgénicos no sufrían niveles elevados de daño oxidativo y que vivían, por término medio, un 32 por ciento más que los gusanos normales. De hecho, cuando administraba el antioxidante vitamina C a los gusanos transgénicos, la ventaja en la supervivencia desaparecía. Hekimi concluye que el superóxido no actúa en el cuerpo de los gusanos como una molécula destructiva, sino como una señal protectora que activa la expresión de los genes que ayudan a reparar el daño celular.

En un experimento complementario, Hekimi aplicó a gusanos normales, desde su nacimiento, pequeñas cantidades de un herbicida común que induce la producción de radicales libres en animales y plantas. En el mismo artículo publicado en 2010 presentó los resultados, contrarios a los esperados: los gusanos inmersos en la toxina vivieron un 58 por ciento más que los animales sin tratar. De nuevo, al alimentar los gusanos con antioxidantes se amortiguaban los efectos beneficiosos de la toxina. Por último, en abril de 2012, él y sus colaboradores demostraron que la eliminación o desactivación de los cinco genes que codifican enzimas superóxido dismutasas apenas alteraba la longevidad de los gusanos.

¿Significan esos resultados que la teoría de los radicales libres es errónea? Simon Melov, bioquímico del Instituto Buck para la Investigación del Envejecimiento en Novato (California), cree que probablemente no exista una respuesta sencilla. Los radicales pueden resultar beneficiosos en algunos contextos y perjudiciales en otros. Se ha demostrado de manera indiscutible que una gran cantidad de daño oxidativo provoca cáncer y alteraciones en los órganos, y numerosas pruebas indican que el daño oxidativo influye en la aparición de algunas enfermedades crónicas, como las cardiopatías. Además, investigadores de la Universidad de Washington han demostrado que los ratones viven más tiempo cuando se los genomanipula para que produzcan grandes cantidades de un antioxidante denominado catalasa. No obstante, afirmar que el daño oxidativo contribuye, en ciertos casos,

al envejecimiento es muy distinto a afirmar que impulsa la patología, señala Melov. Probablemente, el envejecimiento no constituye una entidad monolítica con una única causa y una única cura; suponer tal hecho era hacerse ilusiones.

CAMBIO DE PERSPECTIVA

Si los radicales libres se acumulan durante el envejecimiento pero no necesariamente lo causan, entonces ¿cuáles son sus efectos? Hasta ahora, esa cuestión ha generado más especulaciones que datos definitivos.

Hekimi sostiene que, en realidad, forman parte de un mecanismo de defensa. Los radicales se producirían, en algunos casos, en respuesta al daño celular, como una especie de señal que pondría en marcha los mecanismos de reparación del propio organismo. Según esta hipótesis, representarían una consecuencia de los daños relacionados con la edad, no la causa de ellos. Sin embargo, en cantidades elevadas, los radicales también generarían daños, afirma Hekimi.

La idea general de que las agresiones leves ayudarían al organismo a resistir otras mayores no es nueva. Así es como los músculos se hacen más fuertes en respuesta a un aumento gradual del esfuerzo a que son sometidos. De hecho, muchos de los que practican deporte de forma esporádica han aprendido, mediante una dolorosa experiencia, que un brusco incremento de ejercicio físico exigido a su organismo tras un largo período de inactividad es una garantía casi segura de acabar con una distensión de los gemelos o tendones, entre otras lesiones de importancia.

En 2002, investigadores de la Universidad de Colorado en Boulder administraron a gusanos, durante un tiempo breve, calor o compuestos químicos que inducían la producción de radicales libres. Demostraron que esos factores de estrés ambiental estimulaban la capacidad del gusano para soportar más adelante agresiones más graves. Los tratamientos también aumentaron la esperanza de vida de los gusanos en un 20 por ciento. Sin embargo, no se sabe muy bien el efecto de esos tratamientos en los niveles globales de daño oxidativo, ya que no fueron evaluados. En 2010, científicos de la Universidad de California en San Francisco y de la Universidad Pohang de Ciencia y Tecnología en Corea del Sur publicaron en la revista *Current Biology* que algunos radicales libres inducían la expresión de *HIF-1*, gen responsable de la activación de otros genes involucrados en la reparación celular, entre ellos uno que ayuda a reparar el ADN mutado.

Los radicales libres contribuirían también a explicar por qué el ejercicio físico resulta beneficioso. Durante años se ha creído que el ejercicio es saludable a pesar de que produce radicales libres, no a causa de ellos. Sin embargo, en un artículo publicado en 2009 en la revista *Proceedings of the National Academy of Sciences USA*, Michael Ristow, catedrático de nutrición en la Universidad Friedrich Schiller de Jena, y sus colaboradores compararon los perfiles fisiológicos de deportistas que tomaban antioxidantes con los de deportistas que no los tomaban. A semejanza de los resultados obtenidos por Richardson en ratones, Rostov descubrió que los que no ingerían vitaminas estaban más sanos que los que sí lo hacían; entre otras cosas, presentaron una menor tendencia a desarrollar diabetes de tipo 2. Las investigaciones de Beth Levine, microbióloga del Centro Médico del Suroeste, de la Universidad de Texas, han revelado que el ejercicio también intensifica la autofagia, un proceso biológico en el que las células reciclan fragmentos de proteínas desgastadas por el uso y otros elementos subcelulares. Y para digerir y desmontar las moléculas viejas se sirven, precisamente, de los radicales libres. Sin embargo, solo para complicar un poco más las cosas, la investigación de Levine indica que la autofagia reduce también la cantidad global de radicales libres, lo que sugiere que distintos tipos y cantidades de ellos en diferentes partes de la célula desempeñarían diversas funciones, según las circunstancias.

EL MITO DE LOS ANTIOXIDANTES

Si los radicales libres no siempre son perjudiciales, puede entonces que sus antídotos, los antioxidantes, no siempre resulten beneficiosos. Una posibilidad inquietante, dado que el 52 por ciento de los estadounidenses ingiere diariamente dosis considerables de antioxidantes, como la vitamina E y el betacaroteno, en forma de suplementos multivitamínicos. En 2007, el *Journal of the American Medical Association* publicó una revisión sistemática de 68 ensayos clínicos en la que se concluía que los suplementos antioxidantes no reducían el riesgo de muerte. Cuando los autores limitaron su revisión a los ensayos con menos posibilidades de estar sesgados (aquellos en los que la asignación de los participantes en los grupos del estudio se había realizado claramente al azar, y en los que tanto investigadores como participantes desconocían el tipo de comprimidos que tomaba cada uno), descubrieron que ciertos antioxidantes se asociaban a un mayor riesgo de muerte, en algunos casos hasta un 16 por ciento más elevado.

Varias organizaciones de los Estados Unidos, entre las que figuran la Asociación Estadounidense del Corazón y la Asociación Estadounidense de la Diabetes, recomiendan hoy no tomar suplementos antioxidantes salvo para tratar una insuficiencia vitamínica diagnosticada. «La bibliografía nos aporta cada vez más pruebas de que esos suplementos, especialmente a dosis elevadas, no ejercen necesariamente los efectos beneficiosos que se creía», comenta Demetrius Albanes, profesor de investigación de la Sección de Epidemiología Nutricional del Instituto Nacional del Cáncer de EE.UU. Por el contrario, afirma, «nos hemos dado cuenta de sus posibles desventajas».

Sin embargo, resulta difícil imaginar que los antioxidantes, algún día, lleguen a caer completamente en desgracia. O que la mayoría de los investigadores que estudian el envejecimiento terminen por aceptar, a falta de muchas más pruebas, la idea de que los radicales libres son beneficiosos. Sin embargo, poco a poco los datos hacen pensar que el envejecimiento resulta mucho más intrincado y complejo de lo que imaginó Harman hace casi 60 años. Gems, entre otros, cree que los datos apuntan hacia una nueva teoría, según la cual el envejecimiento surge de la hiperactividad de ciertos procesos biológicos implicados en el crecimiento y la reproducción. Pero con independencia de la idea (o ideas) que escojan los científicos para seguir avanzando, el esfuerzo constante para profundizar en los hechos está llevando el campo hacia un terreno algo más extraño, pero también un poco más real. Lo que representa, según Gems, una increíble bocanada de aire fresco.

PARA SABER MÁS

Is the oxidative stress theory of ageing dead? Viviana I. Pérez et al. en *Biochimica et Biophysica Acta*, vol. 1970, n.º 10, págs. 1005-1014, octubre de 2009.

Biology of aging: Research today for a healthier tomorrow. Instituto Nacional sobre el Envejecimiento. Institutos Nacionales de la Salud, noviembre de 2011. **www.nia.nih.gov/health/publication/biology-aging**

Alternative perspectives on aging in *Caenorhabditis elegans*: Reactive oxygen species or hyperfunction? David Gems y Yila de la Guardia en *Antioxidants & Redox Signaling*. Publicado en línea el 24 de septiembre de 2012.

PSICOLOGÍA

LA SABIDURÍA DE LOS PSICÓPATAS

Podemos aprender mucho de los psicópatas. Algunos aspectos de su personalidad e intelecto resultan, a menudo, marcas distintivas del éxito

Kevin Dutton

ALGUNOS DE LOS RASGOS COMUNES EN LOS ASESINOS EN SERIE PSICOPÁTICOS, COMO LOS AIRES de grandeza, la capacidad de persuasión, el encanto superficial, la crueldad, la falta de remordimientos y la manipulación de los demás, los comparten también políticos y líderes mundiales. Individuos que se lanzan a la carrera, no para huir de la policía, sino por un puesto político. Este perfil permite a quienes poseen estos rasgos hacer lo que quieran y cuando quieran, sin inmutarse en lo más mínimo por las consecuencias sociales, morales y legales de sus acciones.

Si usted, por ejemplo, nació con buena estrella y tiene un poder sobre la mente humana como el de la Luna sobre los mares, podría ordenar el genocidio de 100.000 kurdos y arrastrarse hasta la horca con tal arcana obstinación como para provocar, incluso entre sus más firmes detractores, un perverso y mudo respeto.

«No tenga miedo, doctor», dijo Saddam Hussein en el patíbulo, momentos antes de su ejecución. «Esto es para hombres.»

Si es usted violento y malicioso como el «Hannibal Lecter» de la vida real, Robert Maudsley, podría tomar como rehén a su compañero de celda, aplastarle el cráneo y degustar sus sesos con una cuchara con tanta indiferencia como si tomara un huevo pasado por agua. (Por cierto, Maudsley ha estado encerrado en confinamiento solitario en una jaula a prueba de balas en el sótano de la prisión de Wakefield, en Inglaterra, durante los últimos 30 años.)

O si es usted un brillante neurocirujano, despiadadamente frío y capaz de mantenerse centrado aun bajo presión, podría, igual que el hombre a quien llamaré doctor Geraghty, probar suerte en un terreno de juego completamente distinto: en las remotas fronteras de la medicina del siglo XXI, donde el riesgo sopla con vientos de 160 kilómetros por hora y el oxígeno de la deliberación es escaso. «No tengo compasión por aquellos a los que opero», me dijo. «Ese es un lujo que no me puedo permitir. En el quirófano, renazco: como una máquina fría y sin corazón, totalmente aunado con el bisturí, el taladro y la sierra. Cuando te dejas llevar y burlas a la muerte en los confines del cerebro, los sentimientos no sirven para nada. La emoción es entropía, y es mala para el negocio. Le he dado caza hasta conseguir extinguirla con los años.»

Geraghty es uno de los mejores neurocirujanos del Reino Unido y a pesar de que, en parte, sus palabras causan escalofríos, a otro nivel son completamente lógicas. En lo más



ILUSTRACIÓN DE TIM BOWER

profundo de los guetos de algunos de los barrios más peligrosos del cerebro, el psicópata se vislumbra como un depredador solitario y despiadado, una especie aislada de atractivo fugaz y mortal. Tan pronto como se corre la voz, las imágenes de asesinos en serie, violadores y terroristas locos y solitarios acuden al acecho por las aceras de nuestra mente.

Pero ¿qué tal si le presentara un escenario diferente?, ¿qué pasaría si le dijera que el pirómano que quema su casa podría también, en un universo paralelo, resultar el héroe que, con mayor probabilidad, se enfrentaría a las vigas incendiadas de un edificio en llamas derrumbándose para ir a la búsqueda y rescate de sus seres queridos? ¿O que ese chico con un cuchillo en las sombras del fondo de una sala de cine podría perfectamente, en años posteriores, usar un tipo de cuchillo totalmente diferente en el fondo de una sala completamente distinta?

Es cierto que afirmaciones como estas resultan difíciles de creer, pero son verdaderas. Los psicópatas carecen de miedo, están seguros de sí mismos, son carismáticos, despiadados y centrados. Pero, en contra de la creencia popular, no son necesariamente violentos. Lejos de tratarse de una disyuntiva clara (usted es o no es un psicópata), este trastorno posee zonas centrales y periféricas: un poco como las zonas tarifarias de un mapa del metro. Existe un espectro de psicopatía en el cual cada uno de nosotros tiene su lugar, con solo una pequeña minoría de residentes en la zona A del «centro de la ciudad».

Piense en los rasgos psicopáticos como en los diales de la mesa de mezclas de un estudio de grabación. Si los sube todos al máximo, producirá una banda sonora que no le va a servir a nadie. Pero si la banda sonora se gradúa y algunos diales se sitúan más arriba que otros (como la ausencia de miedo, la concentración, la falta de empatía y la dureza mental) es posible obtener un cirujano sobresaliente.

La cirugía es, por supuesto, solo un caso donde el «talento» psicopático puede resultar ventajoso. Existen otros. En 2009, decidí realizar mi propia investigación para establecer si, en caso de que los psicópatas fueran realmente mejores descodificando la vulnerabilidad (tal como habían hallado otros estudios), esto podría tener aplicaciones. Tenía que haber modos en los que, en vez de ser una carga para la sociedad, esta habilidad confiriera alguna ventaja. Y tenía que haber formas de estudiarlo.

La inspiración surgió cuando me reuní con un amigo en el aeropuerto. Todos nos volvemos un poco paranoicos al pasar por la aduana, reflexioné. Incluso cuando somos totalmente inocentes. Pero imagínese cómo nos sentiríamos si tuviésemos algo que esconder. ¿Y si un agente de seguridad tuviese un talento especial para detectar este sentimiento?

Para averiguarlo, decidí desarrollar mi propio experimento. Treinta estudiantes universitarios participaron en él: la mitad de ellos puntuaban alto en la escala autoadministrada de psicopatía (LSRP) y la otra mitad puntuaba bajo. También había cinco «cómplices». La labor de los estudiantes era simple. Tenían que permanecer sentados en un aula y observar los movimientos de los cómplices al entrar por una puerta y salir por otra, atravesando en el camino una pequeña tarima elevada. Pero había una trampa. También debían anotar quién era «culpable»: ¿cuál de los cinco ocultaba un pañuelo escarlata?

Para aumentar el interés y proporcionar a los observadores un aliciente para «continuar», se entregaron 100 libras al cómplice que ocultaba el pañuelo. Si el jurado decidía que este era el culpable, es decir, si al hacer recuento de votos el que había recibido el dinero obtenía el mayor número de ellos, tenía que devolver el dinero. Si, por el contrario, se salía con la suya y la sospecha recaía sobre otro de los cómplices, el verdadero culpable sería recompensado: podría quedarse con las 100 libras. ¿Cuál de los estudiantes sería el mejor «agente de aduanas»? ¿Sería fiable el instinto depredador de los psicópatas? ¿O les traicionaría su olfato para la vulnerabilidad?

Más del 70 por ciento de los que puntuaron alto en la escala LSRP detectaron correctamente al cómplice que ocultaba el pañuelo, comparado con solo el 30 por ciento de los que obtuvieron puntuaciones bajas. Concentrarse en la debilidad puede perfectamente ser parte de la caja de herramientas del asesino en serie. Pero puede ser también de utilidad en el aeropuerto.



Kevin Dutton es psicólogo investigador en el Centro de Investigación Calleva para la Evolución y las Ciencias Humanas del Colegio Magdalen, en la Universidad de Oxford.

FUENTE: PAUL WILLIAMS

EN SÍNTESIS

Los rasgos psicopáticos pueden aparecer en distinto grado en cada individuo. Es el nivel y la combinación en la que se presentan lo que determina si se trata o no de una psicopatía patológica.

Estos atributos pueden ser de utilidad a la hora de desempeñar determinadas profesiones. Su adecuada graduación puede conferir una ventaja en la realización de ciertas actividades sin suponer una carga social.

LA CIENCIA DEL TRANVÍA

Joshua Greene, psicólogo de la Universidad Harvard, ha observado cómo los psicópatas descifran dilemas morales. Tal como describí en mi libro de 2011, *Split-second persuasion*, Greene ha tropezado con algo interesante. Lejos de ser uniforme, la empatía es esquizofrénica. Existen dos variedades: la cálida y la fría.

Considere, por ejemplo, el siguiente dilema (caso 1) que propuso por primera vez la filósofa contemporánea Philippa Foot. Un vagón de ferrocarril se lanza por una vía. En su trayecto se encuentran cinco personas, atrapadas en los raíles y que no pueden escapar. Por suerte, usted puede accionar un cambio de agujas que desviará el vagón por una bifurcación lejos de las cinco personas, pero pagará un precio. Otra persona se encuentra atrapada en ese desvío y el vagón la matará en vez de a las demás. ¿Debería usted darle a la palanca?

La mayoría de nosotros decidimos qué hacer en esta situación sin demasiada dificultad. A pesar de que la perspectiva de accionar la palanca no resulta precisamente agradable, la opción utilitaria, matar solo a una persona en vez de cinco, representa la opción «menos mala». ¿Cierto?

Considere ahora la siguiente variación (caso 2), que propuso la filósofa Judith Jarvis Thomson. Como en el caso anterior, un vagón de ferrocarril se desliza sin control por una vía a punto de arrollar a cinco personas. Pero en esta ocasión usted se encuentra situado sobre una pasarela por encima de las vías, detrás de un desconocido de gran tamaño. La única forma de salvar a las cinco personas es tirando al desconocido a las vías. Sucumbirá a una muerte segura. Pero su voluminoso cuerpo bloqueará el vagón, salvando cinco vidas. Pregunta: ¿debería usted empujar al desconocido?

Aquí podría usted decir que nos encontramos ante un «verdadero» dilema [*véase* «El cerebro ético ante el dilema», por N. Ló-

pez Moratalla y E. Sueiro Villafranca; en Mente y cerebro 50, 2011]. A pesar de que el recuento de muertes es exactamente el mismo que en el primer ejemplo (cinco frente a una), participar en el juego que nos proponen nos pone un poco más circunspectos y nerviosos. ¿Por qué? Greene cree que posee la respuesta. Tiene que ver con las distintas regiones «climáticas» del cerebro.

El caso 1 se trata, propone, de lo que podríamos llamar un dilema moral impersonal e involucra aquellas áreas del cerebro, la corteza prefrontal y la corteza parietal posterior (en particular, la corteza paracingulada anterior, el polo temporal y el surco temporal superior), implicadas en nuestra experiencia objetiva de empatía fría: el razonamiento y el pensamiento racional.

El caso 2, por otra parte, es lo que podríamos llamar un dilema moral personal. Martillea la puerta que abre el centro de la emoción del cerebro, la amígdala, circuito de la empatía cálida.

Del mismo modo que la mayoría de los miembros normales de la población, los psicópatas no piensan demasiado en el dilema presentado en el caso 1. Aunque (y aquí es donde la trama se complica), al contrario que las personas normales, tampoco le dan muchas vueltas al caso 2. Los psicópatas arrojarían al hombre gordo por la borda sin pestañear.

Si profundizamos un poco más, vemos que esta diferencia en el comportamiento se refleja claramente en el cerebro. El patrón de activación neural en los psicópatas y en las personas normales coincide ante la presentación de dilemas morales impersonales, pero diverge drásticamente cuando las cosas se vuelven un poco más personales.

Imagínese que fuera a colocarlo en una máquina de resonancia magnética funcional y que luego le presentara los dos dilemas. ¿Qué observaría durante el proceso en el que sopesa sus delicados aspectos morales? Justo alrededor del momento en que la naturaleza del dilema pasa de impersonal a personal, vería su amígdala y los circuitos cerebrales relacionados (como su corteza orbitofrontal medial) iluminados como una máquina tragaperras. En otras palabras, presenciaría el momento en que la emoción deposita el dinero en la ranura.

Pero en un psicópata, vería solo oscuridad. El casino neural cavernoso se cerraría y se abandonaría: el cruce de impersonal a personal se realizaría sin el menor incidente.

LA MEZCLA DEL PSICÓPATA

La cuestión de qué es lo que se necesita para alcanzar el éxito en determinada profesión, proporcionar resultados y completar el trabajo, no resulta tan difícil de responder cuando se analiza en detalle. Junto con el conjunto de destrezas necesarias para realizar las tareas específicas asignadas a cada uno (en derecho, en los negocios o en cualquier otro campo que se le ocurra), existe una selección de rasgos que se traducen en un alto rendimiento.

En 2005, Belinda Board y Katarina Fritzon, entonces en la Universidad de Surrey, en Inglaterra, realizaron un estudio para averiguar qué era lo que señalaba a los líderes empresariales. Querían saber cuáles eran las facetas clave de la personalidad que separaban a los que giraban hacia la izquierda cuando subían a un avión de los que giraban hacia la derecha.

Board y Fritzon escogieron tres grupos de participantes —administradores de empresas, pacientes psiquiátricos y criminales hospitalizados (unos que eran psicópatas y otros que sufrían otras enfermedades psiquiátricas)— y compararon sus puntuaciones en una prueba de evaluación de su perfil psicológico.

Su análisis reveló que algunos atributos psicopáticos aparecían con mayor frecuencia en líderes empresariales que en los criminales perturbados. Entre estos atributos se encontraban el encanto superficial, el egocentrismo, la capacidad de persuasión, la ausencia de empatía, la independencia y la concentración. La principal diferencia entre los grupos radicaba en los aspectos más «antisociales» del síndrome: en los criminales, los diales de transgresión de la ley, agresión física e impulsividad (utilizando nuestra primera analogía) se encontraban en las posiciones más elevadas.

Otros estudios parecen confirmar la representación de la «mesa de mezclas», es decir, que la frontera entre la psicopatía funcional y patológica no depende de la presencia de atributos psicopáticos en sí, sino de sus niveles y del modo en que se combinan. El grupo de Mehmet Mahmut, de la Universidad Macquarie en Sydney, ha mostrado que los patrones de disfunción cerebral (patrones en el funcionamiento de la corteza orbitofrontal, el área del cerebro que regula la entrada de las emociones en la toma de decisiones) observados en psicópatas, tanto criminales como no criminales, exhiben diferencias a nivel dimensional en vez de categóricas. Según Mahmut, esto significa que los dos grupos no deberían considerarse como poblaciones cualitativamente distintas, sino como ocupantes de diferentes posiciones en una misma dimensión continua.

Piense en los rasgos psicopáticos como en los diales de la mesa de mezclas de un estudio de grabación

En un experimento similar —aunque sin tanta alta tecnología—, pedí a una clase de estudiantes universitarios de primer año que imaginaran que eran gerentes de una agencia de colocación de empleo. «Despiadado, intrépido, encantador, amoral y centrado», les dije. «Suponed que tenéis un cliente con este perfil. ¿En qué tipo de puesto de trabajo creéis que encajaría mejor?»

Sus respuestas no podrían haber sido más reveladoras. Director ejecutivo, espía, cirujano, político, militar... todos estos salieron en la mezcla. Entre asesinos en serie, homicidas y ladrones de bancos.

«La habilidad intelectual en sí misma no es más que un modo elegante de quedar segundo», me dijo un director ejecutivo de éxito. «Acuérdese, no le llaman cucaña por nada. El camino hacia la cima es duro. Pero es más fácil escalar si trepas sobre otros para hacerlo. Todavía más fácil si estos creen que así lograrán algo».

John Moulton, uno de los capitalistas de riesgo más exitosos de Londres, está de acuerdo. En una entrevista reciente para el *Financial Times*, enumeró la determinación, la curiosidad y la insensibilidad como sus tres rasgos de personalidad más valiosos. No se dan premios por adivinar los dos primeros. ¿Pero la insensibilidad? Lo mejor de la insensibilidad, explica Moulton, es que «te deja dormir cuando los demás no pueden».

PARA SABER MÁS

What «psychopath» means. Scott O. Lilienfeld y Hal Arkowitz en *Scientific American Mind*, vol. 18, n.º 6, págs. 80-81, diciembre de 2007/enero de 2008.

Inside the mind of a psychopath. Kent A. Kiehl y Joshua W. Buckholtz en *Scientific American Mind*, vol. 21, n.º 4, págs. 22-29, septiembre/octubre de 2010.

How to act like a psychopath without really trying [extracto]. John Whitfield. Publicado en *Scientific American* en línea el 9 de diciembre de 2011.



Michael Kramer es director del Instituto Max Planck de Radioastronomía (MPIfR) de Bonn y profesor de astrofísica de las universidades de Bonn y Manchester. Formó parte del equipo que en 2003 descubrió el púlsar doble PSR J0737-3039.

Norbert Wex lidera el grupo teórico del departamento de física fundamental en radioastronomía del MPIfR. Es experto en teorías relativistas de la gravitación.

ASTROFÍSICA

Púlsares y ondas gravitacionales

Gracias a las señales emitidas por algunas estrellas de neutrones, los astrónomos esperan confirmar pronto una de las predicciones más robustas de la teoría de la relatividad

Michael Kramer y Norbert Wex

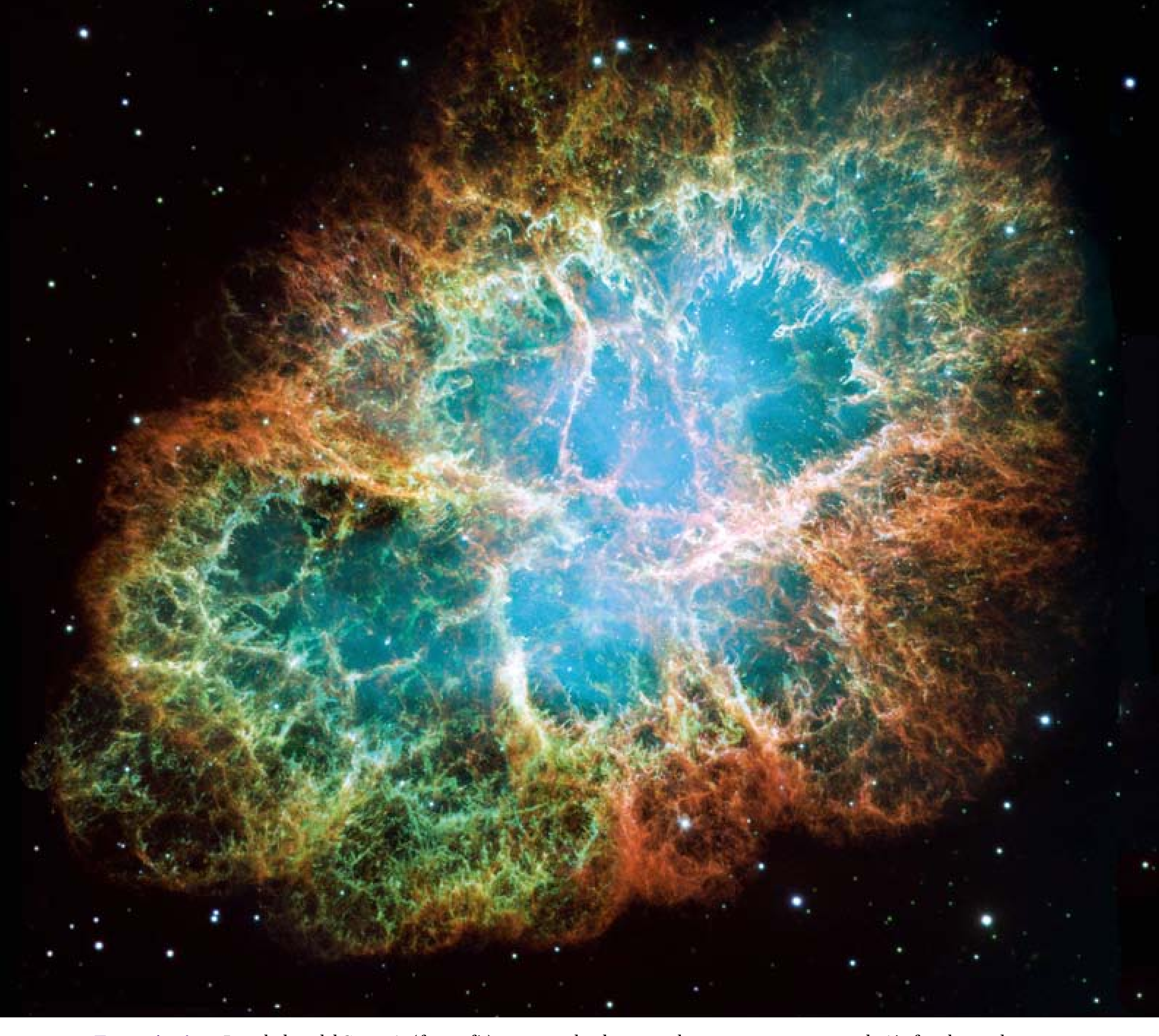
Para Newton, el espacio constituía el escenario inmutable donde se desarrollaban los acontecimientos de un universo en el que el tiempo fluía de manera uniforme. Más de dos siglos después, la teoría de la relatividad de Albert Einstein supuso el abandono de esa visión estática. Hoy sabemos que el espacio puede curvarse y estirarse, y que también el tiempo puede transcurrir más rápido o más despacio. Esta idea pone a nuestra disposición todo tipo de posibilidades para explorar el universo. Los astrónomos confían en que, dentro de poco, será posible estudiar algunos de los fenómenos más violentos del cosmos gracias a la detección de ondas gravitacionales: distorsiones del espaciotiempo que, generadas por cuerpos muy masivos en movimiento acelerado, se propagan por el universo a la velocidad de la luz.

EN SÍNTESIS

Los púlsares son estrellas de neutrones que rotan a enormes velocidades. Sus señales de radio llegan a la Tierra con una regularidad equiparable a la de algunos relojes atómicos.

Gracias a los sistemas estelares binarios en los que toman parte esos objetos, los astrónomos ya han obtenido las primeras pruebas indirectas de la existencia de ondas gravitacionales.

A partir de la observación simultánea de las señales procedentes de múltiples púlsares, varios proyectos esperan detectar pronto de manera directa ondas gravitacionales.

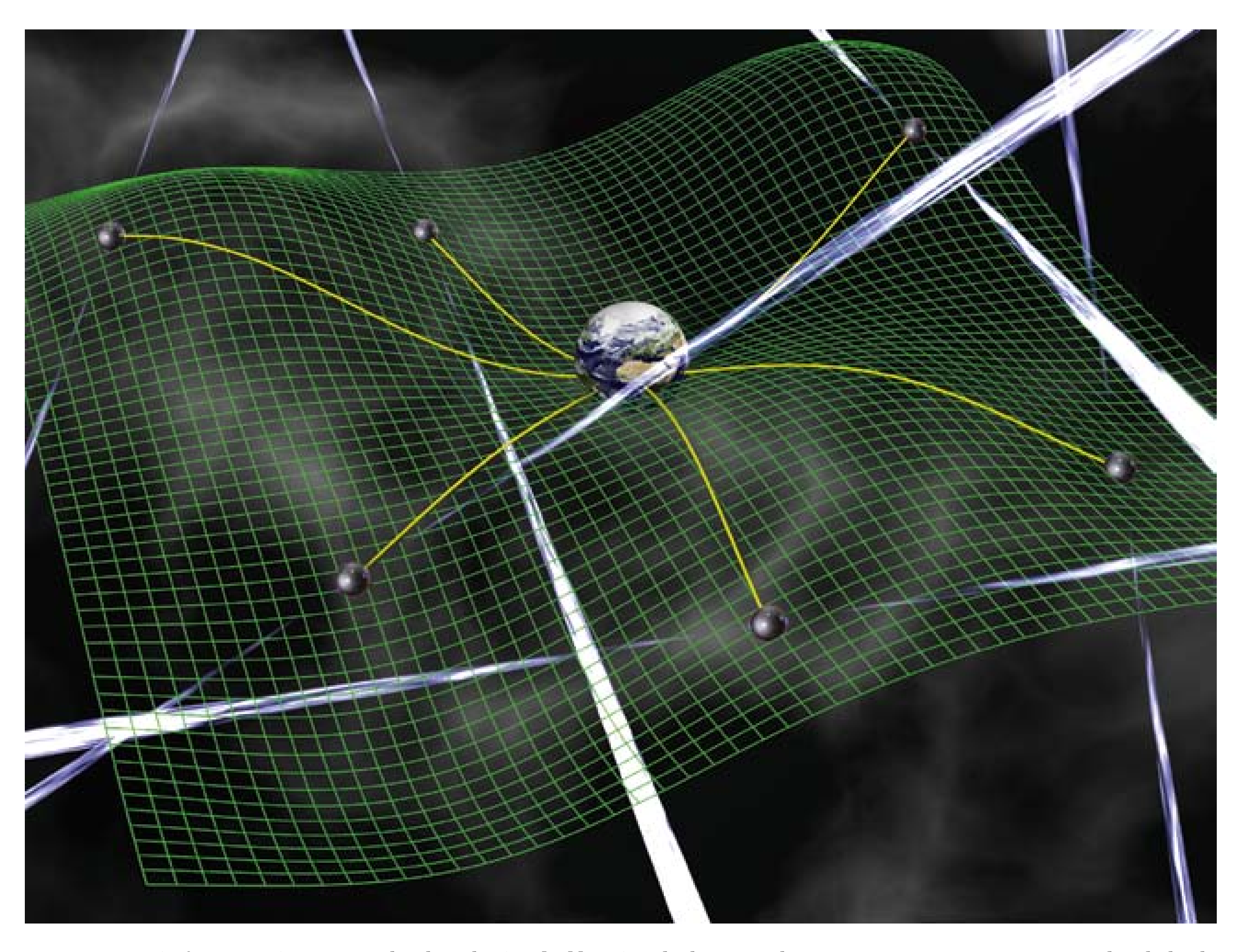


Faros cósmicos: **La nebulosa del Cangrejo (*fotografía*) corresponde a los restos de una supernova cuya explosión fue observada por astrónomos chinos en el año 1054. Situada a 6500 años luz de la Tierra, mide unos 11 años luz de diámetro. En el centro de la nebulosa se encuentra un púlsar: una estrella de neutrones de unos 15 kilómetros de radio que rota sobre sí misma con un período de 33 milisegundos. Los astrónomos analizan las señales emitidas por objetos de este tipo a fin de obtener pruebas directas de la existencia de ondas gravitacionales.**

NASA/ESA/STSCI/UNIVERSIDAD ESTATAL DE ARIZONA, ALLISON LOLL Y JEFF HESTER

Según la teoría de la gravitación universal de Newton, la fuerza de la gravedad se transmite de manera instantánea a cualquier punto del espacio, sin importar la distancia. Newton jamás imaginó que la gravedad pudiese sufrir perturbaciones que se desplazasen a velocidad finita, como ocurre con las ondas que se generan sobre la superficie de un estanque al arrojar una piedra. A comienzos del siglo xx, sin embargo, algunos físicos comenzaron a considerar ideas de este tipo. Henri Poincaré, por ejemplo, trató de explicar la precesión del perihelio de Mercurio (la continua rotación de los ejes de la órbita del planeta sobre su propio plano) mediante «ondas de aceleración». Sin embargo, el primero en proporcionar una descripción satisfactoria de las ondas gravitacionales fue Albert Einstein, en el marco de su teoría de la relatividad general. Einstein también se percató de que dichas ondas no guardaban ninguna relación con el desplazamiento del perihelio de Mercurio. En su lugar, el fenómeno obedecía a otra de las consecuencias de su teoría: la curvatura del espaciotiempo inducida en las proximidades del Sol.

Desde entonces y hasta hoy, la interacción gravitatoria se considera una cualidad del espaciotiempo. Tanto el espacio como el tiempo constituyen entidades dinámicas, cuyas propiedades métricas quedan determinadas por la distribución de masas en el universo. A su vez, la geometría del espaciotiempo dicta cómo se mueven dichas masas. En junio de 1916, Einstein halló que tales principios implicaban que el espaciotiempo podría sufrir pertur-



Los púlsares (*esferas grises*) **emiten ondas de radio (*azul y blanco*) en la dirección de su eje magnético. Rotan a gran velocidad y de manera muy uniforme, por lo que sus señales alcanzan la Tierra en forma de pulsos cortos a intervalos de tiempo muy regulares. Las ondas gravitacionales inducen perturbaciones en la estructura del espaciotiempo (simbolizado aquí como una malla), lo que provoca ligeras variaciones en los tiempos de llegada de esas señales. La observación simultánea de un conjunto adecuado de púlsares permitiría deducir las características físicas de dichas ondas (*representación esquemática*).**

DAVID J. CHAMPION, INSTITUTO MAX PLANCK DE RADIOASTRONOMÍA

baciones de tipo ondulatorio que se propagarían a la velocidad de la luz. Sin embargo, cuando calculó la cantidad de energía que un sistema de cuerpos debería emitir en forma de radiación gravitacional, cometió un error. En su artículo de 1918 «Sobre las ondas de gravitación», corrigió el fallo y obtuvo —salvo un factor 2— su «ecuación del cuadrupolo».

Dicha fórmula conserva hoy un significado fundamental en la física de la gravitación. Como consecuencia de la emisión de ondas gravitacionales, toda masa en movimiento acelerado perderá energía. Esta afirmación se aplica por igual a un automóvil, a la Tierra en su desplazamiento alrededor del Sol o a un sistema binario formado por dos estrellas que orbitan una en torno a la otra. La fórmula del cuadrupolo proporciona, en primera aproximación, la magnitud de dicha fuga energética. Sin embargo, el modelo empleado por Einstein para realizar sus cálculos se basaba en sistemas constituidos por placas de acero balanceándose o pesas en rotación, en los que las masas eran aceleradas por fuerzas mecánicas. Hubo de transcurrir más de medio siglo para que los físicos se percataran de que la fórmula del cuadrupolo continuaba siendo válida cuando las masas experimentaban la aceleración causada por su propia atracción gravitatoria, como ocurre en los sistemas estelares binarios.

Einstein demostró también que las ondas gravitacionales son transversales: se expanden y se contraen en el plano perpendicular a su dirección de propagación. Si, en el curso de su camino, una onda gravitacional se encuentra con dos masas de prueba flotantes separadas por una distancia l, dicha separación variará en una cierta cantidad, Δl. La amplitud de una onda gravitacional se define como la magnitud relativa de ese desplazamiento: $h = \Delta l/l$.

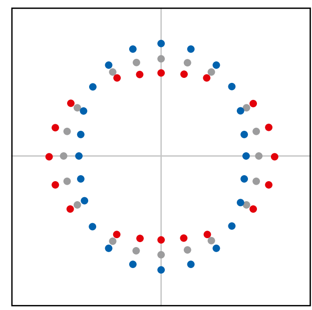
Sin embargo, en el cosmos no abundan procesos físicos que generen ondas gravitacionales de amplitud apreciable. En su órbita en torno al Sol, la Tierra apenas pierde unos 200 vatios en forma de radiación gravitacional, una cantidad insignificante e imposible de medir. En cambio, dos agujeros negros de unas diez masas solares que se encuentren a punto de colisionar pueden llegar a emitir, en una millonésima de segundo, tanta energía en forma de ondas gravitacionales como la que radiará el Sol en forma de ondas electromagnéticas durante 100 millones de años.

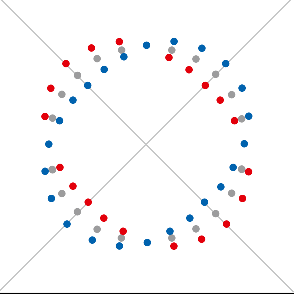
No obstante, la intensidad de las ondas gravitacionales decrece rápidamente con la distancia a la fuente. En el caso de dos agujeros negros en colisión, la amplitud de las ondas a unos pocos miles de años luz de distancia será del orden de

$h = 10^{-16}$; el equivalente a alargar o encoger un segmento de 100 metros en una longitud equiparable al diámetro del núcleo de un átomo de hierro. Con todo, incluso una perturbación tan ligera podría ser observada por los detectores más modernos. El mayor problema al que se enfrentan los investigadores reside en que en la Vía Láctea se producen muy pocas colisiones de agujeros negros. Incluso las explosiones de supernova, otra fuente de ondas gravitacionales, ocurren en nuestra galaxia con una frecuencia aproximada de una vez al siglo. Por ello, para contar con una posibilidad real de observar ondas gravitacionales, un experimento debería ser capaz de detectar las ondas generadas por las explosiones de supernova en el cúmulo de Virgo, un grupo de más de mil galaxias situado a unos 50 millones de años luz.

Con todo, las rápidas mejoras técnicas nos hacen confiar en que la primera detección directa de ondas gravitacionales tal vez llegue dentro de unos años. Ello permitiría confirmar la validez de la teoría de la relatividad general en condiciones extremas, gobernadas por campos gravitatorios muy intensos. En tales casos, ¿se ajusta la teoría a la realidad física o, por el contrario, debe ser modificada?

Aunque la detección directa de ondas gravitacionales constituye un reto aún pendiente, hace ya tiempo que contamos con pruebas indirectas de su existencia. La primera se obtuvo hace más de 30 años, y sus orígenes se remontan a un hallazgo aún anterior, de 1967. Aquel año, Jocelyn Bell Burnell y Anthony Hewish, de la Universidad de Cambridge, descubrieron una nueva clase de astros: los púlsares. Estos objetos se caracterizan por emitir pulsos de ondas de radio que llegan a la Tierra con una regularidad extraordinaria, equiparable en ciertos casos a la de algunos relojes atómicos.





Cuando una onda gravitacional incide en la dirección del eje de un anillo constituido por partículas de prueba en caída libre (*gris*), la configuración experimenta oscilaciones periódicas (*puntos rojos y azules*) en el plano perpendicular a la dirección de propagación de la onda. La figura muestra dos modos de polarización posibles; toda onda gravitacional consta de una superposición de ambos.

Pronto se descubrió que tales astros eran en realidad estrellas de neutrones muy magnetizadas y en rápida rotación. En sus polos magnéticos, las partículas con carga eléctrica sufren grandes aceleraciones y se focalizan en la dirección del eje magnético, en un proceso que genera haces de ondas de radio. Si se da la circunstancia de que la línea de visión desde la Tierra se encuentra en el cono de emisión de la radiación generada, esas ondas de radio podrán detectarse con suma claridad. Debido a la rápida rotación del objeto, las emisiones del púlsar se proyectan sobre la Tierra a intervalos de tiempo muy regulares, como si se tratase de un gran faro cósmico.

Teorías alternativas

A lo largo de los años se han propuesto varias teorías de la gravedad alternativas a la relatividad general de Einstein. Entre otras razones, ello se debe a la dificultad para unificar la relatividad general con el resto de las fuerzas fundamentales de la naturaleza.

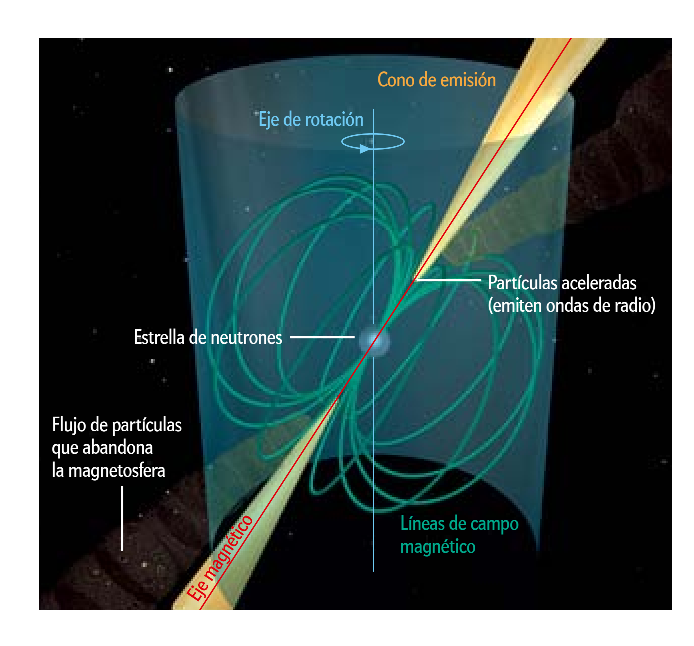
La descripción moderna de las interacciones se basa en el concepto de campo, una entidad física que, como el campo electromagnético o el gravitatorio, llena el espacio. Los campos pueden ser de varios tipos: escalares, vectoriales o tensoriales. Un campo escalar asigna a cada punto del espacio un número. En el caso de los campos vectoriales, a cada punto se le asocia un vector: si, por ejemplo, se trata de una fuerza, además de su magnitud deberemos añadir la dirección y el sentido en que esta actúa. Los campos tensoriales asignan a cada punto una matriz multidimensional.

En la teoría de Einstein, todas las propiedades métricas del campo gravitatorio quedan descritas por un único campo tensorial. Las teorías alternativas suelen incorporar campos adicionales. Ello puede obedecer a consideraciones teóricas, o bien a la necesidad de ajustar la teoría a las observaciones. Una de ellas es la relativa a las curvas de rotación que describen el movimiento de las estrellas en el seno de las galaxias. La única manera de reconciliar estos datos con la teoría de Einstein es postulando la existencia de materia oscura, una hipotética sustancia dotada de masa pero que no absorbería ni emitiría luz, por lo que resultaría invisible. Sin embargo, otra manera de resolver el problema consiste en introducir nuevos campos en la descripción de la gravedad. Algo similar ocurre con la aceleración observada en la expansión del universo. Esta puede explicarse por medio de la energía oscura, pero también como debida a la presencia de campos adicionales.

Algunas de las teorías alternativas más estudiadas añaden campos escalares a la descripción de la gravedad. Una de sus consecuencias es que las ondas gravitacionales poseen propiedades de polarización adicionales, como un modo que estira el espacio en todas direcciones. En numerosas teorías alternativas, la fórmula del cuadrupolo deja de ser válida. En su lugar, la contribución principal a la emisión de ondas gravitacionales por parte de un sistema estelar binario se produce en forma de radiación dipolar. Ello proporciona a los astrónomos un criterio de gran valor para distinguir entre los distintos modelos, ya que, a menudo, la radiación dipolar implica una pérdida de energía mucho mayor que la que corresponde a la radiación cuadrupolar de la teoría de Einstein.

La medición y caracterización de las ondas gravitacionales debería aportar pruebas suficientes para validar o refutar la relatividad general y algunas de las teorías alternativas de la gravedad, sobre todo en el régimen asociado a la presencia de campos gravitatorios muy intensos. Hasta ahora, todas las comprobaciones empíricas han confirmado la validez de la teoría de Einstein, lo cual ha permitido descartar algunas alternativas o imponer límites más estrictos a su dominio de validez.

NORBERT WEX



Los púlsares son estrellas de neutrones dotadas de un intenso campo magnético. En sus polos magnéticos, las partículas con carga eléctrica se aceleran a lo largo de las líneas de campo (*verde*) y salen despedidas a enormes velocidades en la dirección perpendicular a la superficie de la estrella. Como resultado de ese proceso se generan haces de ondas de radio (*naranja*), los cuales pueden detectarse desde nuestro planeta en los momentos en que su dirección de emisión coincide con la línea de visión del objeto. De esta manera, los púlsares se comportan como faros cósmicos que emiten destellos a intervalos de tiempo extremadamente regulares.

MICHAEL KRAMER

UNIVERSO VIOLENTO

Los púlsares almacenan una energía de rotación gigantesca. Se trata de objetos muy compactos que poseen una densidad de materia enorme y un diámetro muy reducido, del orden de unos 20 kilómetros. Se forman cuando, en una explosión de supernova, el núcleo de la estrella colapsa y la energía gravitacional del astro se transforma en energía de rotación. El resultado es una estrella de neutrones que gira sobre sí misma a velocidades extraordinarias. El período de rotación típico de un púlsar ronda el medio segundo (dos vueltas completas por segundo), lo que corresponde a una energía de rotación típica del orden de 10^{40} julios. No obstante, se conocen casos más extremos. El púlsar de la nebulosa del Cangrejo (el remanente de una supernova observada en el año 1054) rota con un período de apenas 33 milisegundos, con lo que almacena una energía unas 200 veces mayor.

Dado que emite parte de su energía en forma de radiación electromagnética, la velocidad de rotación de un púlsar disminuye ligeramente con el tiempo. El período del púlsar del Cangrejo, relativamente joven, aumenta al ritmo de unos 37 nanosegundos cada día. En los más antiguos, esta variación resulta proporcionalmente mucho menor. Cada segundo, el púlsar del Cangrejo radia unos $5{\cdot}10^{31}$ julios. No se trata de una cifra menor: esa cantidad bastaría para satisfacer las necesidades energéticas de la humanidad durante 10.000 millones de años al ritmo de consumo actual. Dicha energía se emite principalmente en forma de flujo de partículas y de radiación dipolar magnética de baja frecuencia.

Los púlsares dotados de un campo magnético más débil y que, en consecuencia, experimentan un frenado mucho más lento, resultan más apropiados para los experimentos astronómicos; en particular, aquellos con períodos de rotación del orden de pocos milisegundos. De estos objetos, el más veloz de los conocidos gira sobre su eje unas 716 veces por segundo (lo que equivale a un período de 1,4 milisegundos) y frena a razón de unos 10^{-14} segundos al día. Tales astros, que reciben el nombre de «púlsares de milisegundo», pueden considerarse como cronómetros cósmicos de una precisión extraordinaria.

La regularidad de la rotación de un púlsar alcanza tales cotas que, para determinar su cadencia de emisión intrínseca a partir de las señales temporales registradas en la Tierra, deben tenerse en cuenta múltiples factores. En primer lugar, ha de considerarse el movimiento de nuestro planeta en torno al centro de masas del sistema solar, el cual provoca que la Tierra se desplace con respecto al púlsar, unas veces acercándose y otras alejándose de él. Por otra parte, deben calcularse los efectos relativistas que, en el sistema solar, influyen sobre las ondas de radio emitidas por el objeto. La llegada del pulso se retrasa más o menos dependiendo de la densidad de electrones que se hallan a lo largo de la línea de visión. Las observaciones realizadas a varias frecuencias permiten calcular con precisión los efectos dispersivos de este tipo. La principal fuente de indeterminación se debe al «tiempo (meteorológico) estelar», lo que obliga a los astrónomos a realizar numerosas mediciones a intervalos regulares.

Cuando un púlsar se mueve en el campo gravitatorio de otro cuerpo (por lo general, en un sistema estelar binario), pueden llevarse a cabo mediciones muy precisas que permiten poner a prueba las predicciones de la relatividad general. El primer púlsar con un acompañante fue descubierto en 1974 por los astrofísicos Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor. Bautizado como PSR B1913+16 en virtud de sus coordenadas celestes y con un período de rotación de unos 59 milisegundos, este objeto orbita en torno a otra estrella de neutrones (invisible por medios directos desde la Tierra). Ya al poco de su hallazgo quedó claro que Hulse y Taylor habían dado con un sistema idóneo para llevar a cabo comprobaciones muy precisas de la teoría de la relatividad.

A medida que el púlsar orbita en torno al centro de masas del sistema, la duración de los pulsos detectados en la Tierra experimenta ligeras variaciones. Tras una investigación de varios años, los científicos lograron calcular con gran exactitud la órbita del sistema y concluyeron que esta se iba reduciendo de manera paulatina. Además, esa disminución orbital se correspondía a la perfección con la pérdida de energía que, de acuerdo con la fórmula del cuadrupolo, debería emitir el objeto en forma de ondas gravitacionales. Aquel hallazgo supuso la primera prueba indirecta de la emisión de ondas gravitacionales, motivo por el que Hulse y Taylor recibieron en 1993 el premio Nobel de física [*véase* «Ondas gravitatorias procedentes de un púlsar orbital», por J. H. Taylor, J. M. Weisberg y L. A. Fowler; Investigación y Ciencia, diciembre de 1981, *y* «Nuevos indicios de la existencia de ondas gravitacionales», por Carlos Allende Prieto, *en este mismo número*].

EL DESCUBRIMIENTO MÁS IMPROBABLE

A pesar de encontrarse a 23.000 años luz de distancia de nosotros, PSR B1913+16 ha sido considerado durante 30 años el «laboratorio» por excelencia para poner a prueba la relatividad general en condiciones de campos gravitatorios muy intensos. Sin embargo, durante todo ese tiempo, los investigadores se afanaron en hallar otro sistema similar pero más cercano a la Tierra y que, por tanto, permitiese efectuar observaciones más precisas.

Eso ocurrió en la primavera de 2003. Aquel año, una colaboración internacional en la que participó uno de nosotros (Kramer) descubrió un púlsar con un período de rotación de 23 milisegundos y que describía una vuelta en torno a un segundo astro cada 147 minutos (en comparación, el de Hulse y Taylor tardaba casi 8 horas). Sin embargo, el aspecto más sensacional del hallazgo llegó algunos meses después, cuando los datos de radiofrecuencias revelaron la existencia de un pulso adicional correspondiente a unos 12,8 hercios. Se trataba de un descubrimiento insólito: el primer sistema estelar doble en el que ambas estrellas eran radiopúlsares activos. Los miembros de esta pareja, única en su especie, recibieron los nombres PSR J0737-3039A (para el púlsar de 23 milisegundos) y PSR J0737-3039B (para su acompañante, que rota con mayor lentitud).

Los fenómenos típicos de la teoría de la relatividad general acontecen con mucha mayor intensidad en el púlsar doble que en el resto de los púlsares conocidos en otros sistemas estelares binarios. Ambos objetos se mueven a una velocidad del orden de un millón de kilómetros por hora a lo largo de sus respectivas órbitas. El primer efecto relativista, la precesión del semieje de la órbita, fue observado dos días después de su descubrimiento. Este fenómeno ocurre a razón de 17 grados al año, lo cual implica que el semieje de la órbita describe una vuelta completa en tan solo 21 años. En comparación, la órbita de Mercurio necesita unos tres millones de años para hacer lo mismo.

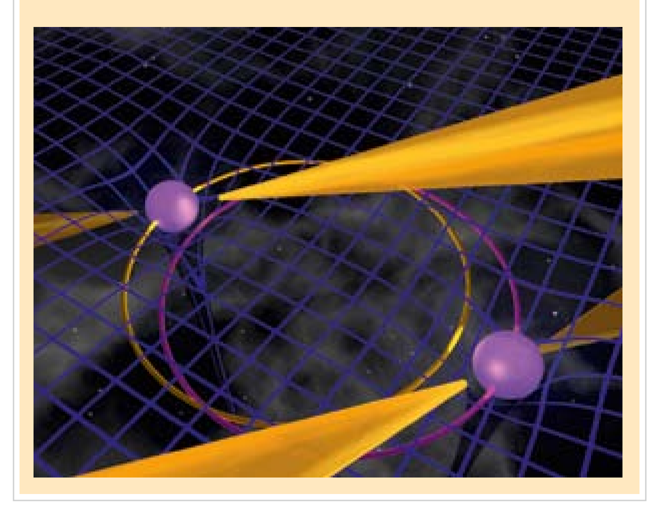
También los efectos debidos a la emisión de ondas gravitacionales resultan mucho mayores en PSR J0737-3039 que los demás púlsares conocidos. La distancia entre ambas estrellas de neutrones se reduce a un ritmo de unos 7 milímetros diarios, como pudo comprobarse tras siete años de observaciones con un error del 0,1 por ciento, muy inferior al obtenido en el púlsar de Hulse y Taylor tras 30 años de observaciones. Dado que el sistema se halla a tan solo 3500 años luz, los efectos del campo gravitatorio galáctico, que tiende a acelerarlo con respecto a nuestro sistema solar, se muestran insignificantes. Ello reviste gran importancia, ya que por lo general resulta difícil aislar tales efectos en los datos de las desviaciones del período de la órbita. Dado que su movimiento propio tiene lugar con una velocidad de apenas diez kilómetros por segundo, el sistema puede considerarse en reposo. Tampoco se registran perturbaciones en lo que concierne al desplazamiento con respecto a su entorno galáctico.

Tal vez algún día PSR J0737-3039 nos permita medir la energía radiada en forma de ondas gravitacionales más allá de la aproximación que proporciona la fórmula del cuadrupolo, la cual da cuenta del 99,9986 por ciento de la energía emitida por el sistema. Para ello, la precisión de las medidas debería aumentar en un factor 70, algo que tal vez se logre dentro de unos cinco o diez años.

Con todo, otras preguntas continúan aún sin respuesta. A lo largo de los años se han propuesto varias teorías de la gravedad alternativas a la relatividad general, algunas de las cuales predicen efectos muy distintos. Sin embargo, dichos efec-

Un laboratorio único

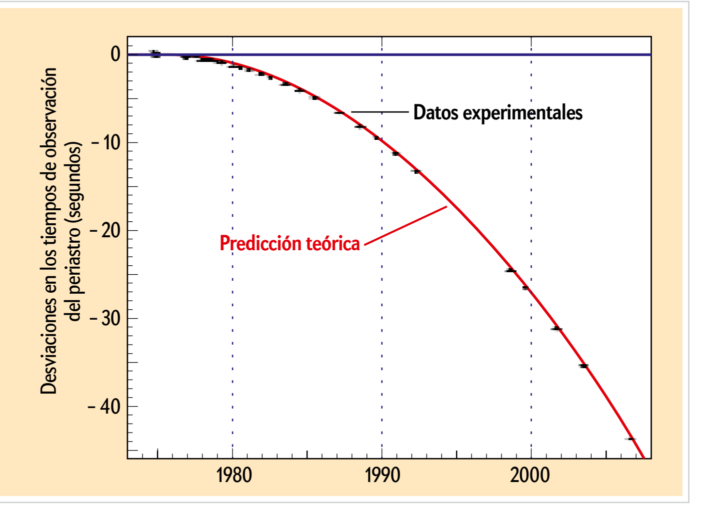
En 2003, un equipo internacional de astrónomos al que pertenecía uno de los autores (Kramer) descubrió el primer sistema estelar binario compuesto por dos radiopúlsares activos. Hoy por hoy, este púlsar doble ofrece el mejor escenario para poner a prueba la teoría de la relatividad general en presencia de campos gravitatorios muy intensos. Esta representación esquemática muestra ambos púlsares (*lila*), así como sus trayectorias (*lila y amarillo*). Estos objetos, muy compactos, curvan el espaciotiempo circundante de manera mucho más acusada que una estrella ordinaria, como el Sol.



Una prueba decisiva

La primera demostración indirecta de la existencia de ondas gravitacionales fue obtenida gracias al púlsar PSR B1913+16, descubierto en 1974 por Russell A. Hulse y Joseph H. Taylor. Ambos astrofísicos hallaron que este objeto no se encontraba aislado, sino que orbitaba en torno a otra estrella de neutrones.

Los investigadores tomaron diversas mediciones del punto de la trayectoria en que el púlsar se hallaba más próximo a su estrella compañera (periastro) y comprobaron que la distancia entre ambos objetos disminuía con el tiempo (*gráfica*). Aquel resultado se correspondía a la perfección con la pérdida de energía debida a la emisión de ondas gravitacionales predicha por la relatividad general.

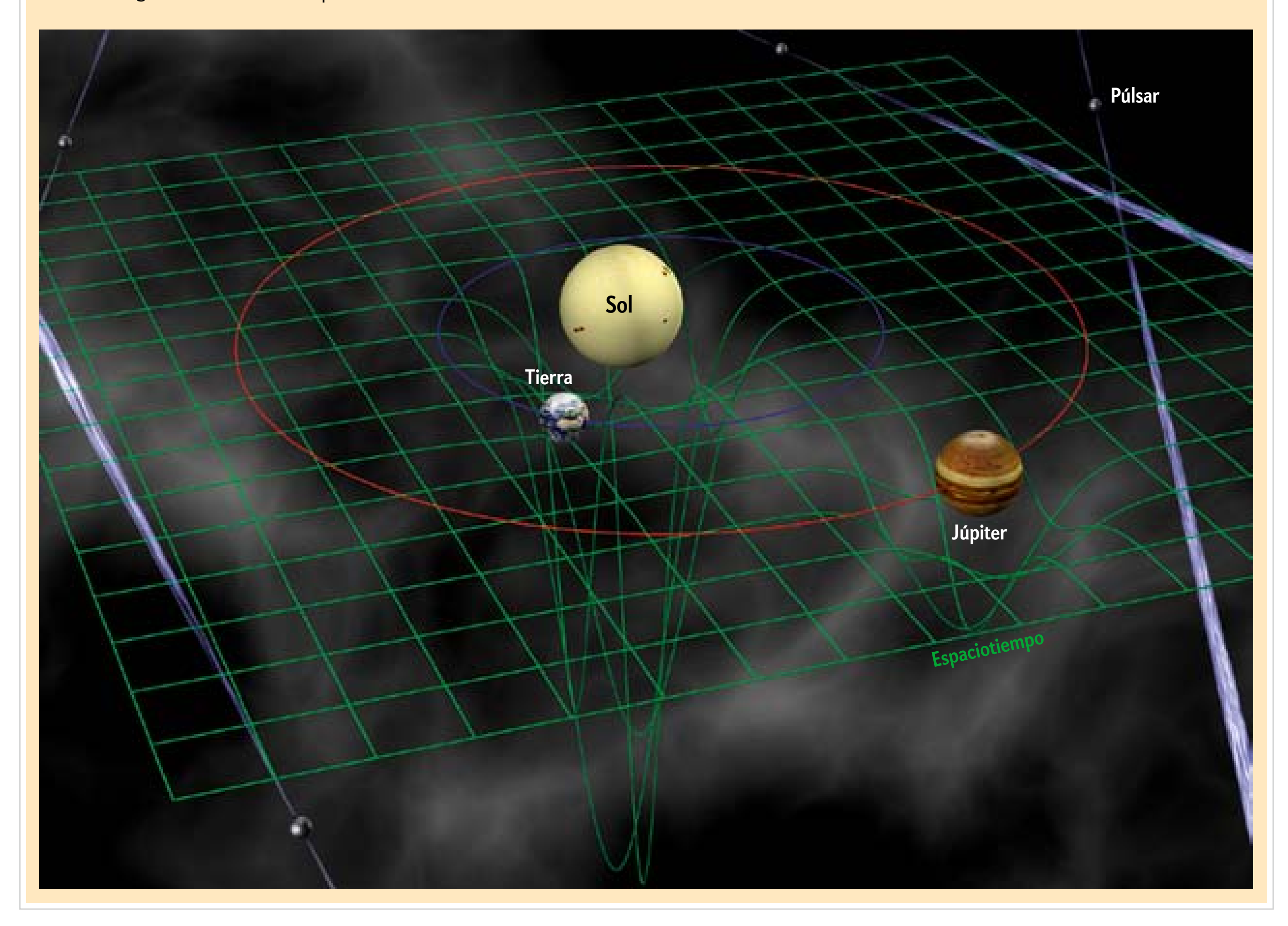


DAVID J. CHAMPION, INSTITUTO MAX PLANCK DE RADIOASTRONOMÍA (*púlsar doble*); NORBERT WEX, SEGÚN WEISBERG, NICE Y TAYLOR, *APJ* 722, PÁG. 1030, 2010 (*gráfica*)

Planetas y púlsares

Si suponemos que un púlsar se comporta como un reloj exacto e independiente de otros fenómenos, podremos incluso «pesar» los planetas del sistema solar. Si la masa o la posición de un planeta no se conocen con exactitud, sus valores pueden calcularse a partir de los tiempos de llegada de las señales del púlsar, cuyas ligeras variaciones dependen de la localización y la masa de los cuerpos en el sistema solar.

Si en el cálculo introducimos un valor incorrecto para la masa de Júpiter, los tiempos obtenidos oscilarán con un cierto período que coincidirá con el período de la órbita de Júpiter. Dicha oscilación irá disminuyendo a medida que corrijamos el valor supuesto de la masa del planeta y esta se aproxime a la cantidad real. Gracias a ello, uno de los autores (Kramer) y otros colaboradores han logrado determinar la masa de Júpiter y sus lunas con una precisión de 200 billonésimas de masas solares. Hasta entonces, esa precisión solo se había logrado con sondas espaciales.



DAVID J. CHAMPION, INSTITUTO MAX PLANCK DE RADIOASTRONOMÍA

tos resultan menores en sistemas formados por dos astros de densidades muy similares, como ocurre en el púlsar doble. Por otra parte, las teorías alternativas de la gravedad suelen contener parámetros libres, los cuales pueden ajustarse sin dificultad para explicar las observaciones realizadas en este sistema. En tales casos, los datos no bastan para determinar si una teoría es correcta o no.

PÚLSARES Y ENANAS BLANCAS

Así pues, nos hallamos en la necesidad de encontrar otros sistemas estelares más útiles. En este aspecto acude en nuestro auxilio una nueva clase de sistemas binarios: aquellos formados por un púlsar y una enana blanca, una estrella poco masiva en las postrimerías de su vida. En tales casos, y a diferencia de lo que ocurre con el púlsar doble o con el de Hulse y Taylor, ambos objetos poseen densidades muy distintas. Esta circunstancia reviste especial interés a la hora de someter a prueba ciertas teorías alternativas de la gravedad en las que intervienen campos escalares (aquellos cuyas partículas asociadas poseen espín cero, como el bosón de Higgs). De acuerdo con estas teorías, el púlsar, mucho más denso que la enana blanca, debería poseer una carga escalar muy superior a la de esta. En particular, ello implica que el sistema habría de perder, en forma de radiación gravitacional dipolar, una cantidad de energía mucho mayor de lo que predice la teoría de la relatividad general.

Tal circunstancia debería observarse con claridad en sistemas con períodos breves. Dos púlsares descubiertos hace ya largo tiempo resultan de especial interés en este sentido: PSR J1141-6545, un púlsar de 394 milisegundos que gira cada 4,7 horas en torno a una enana blanca con una masa similar a la del Sol; y PSR J1738+0333, de 5,9 milisegundos, que cada 8,5 horas completa una órbita en torno a su estrella compañera, de 0,18 masas solares. En este último caso, la enana blanca es tan luminosa que su movimiento puede medirse directamente a través del

desplazamiento Doppler de sus líneas espectrales, lo cual supone una información adicional de gran valor.

Todos los datos obtenidos hasta la fecha han permitido constatar que ambos sistemas se comportan con estricto arreglo a las predicciones de la relatividad general. Por otra parte, se ha observado que, si una estrella de neutrones poseyese carga escalar, esta habría de resultar muy pequeña. Tales observaciones imponen unos límites muy estrictos sobre las teorías alternativas de la gravedad que incluyen campos escalares. En particular, contradicen las predicciones de cierto modelo propuesto por Jacob Bekenstein, de la Universidad Hebrea de Jerusalén, el cual persigue explicar las curvas de rotación galácticas sin necesidad de postular la existencia de materia oscura. Aunque muy popular en algunos ámbitos de la cosmología teórica, dicha teoría resulta difícilmente reconciliable con las observaciones realizadas en esta clase de sistemas binarios.

DETECCIÓN DIRECTA

Hoy por hoy, la detección directa de ondas gravitacionales continúa fuera de nuestro alcance. Ni siquiera el púlsar doble resulta de utilidad en este sentido, ya que la frecuencia de su radiación gravitatoria se estima en unos 0,2 milihercios, muy inferior al umbral de detección de los experimentos en curso.

El primer intento por detectar ondas gravitacionales tuvo lugar con anterioridad al descubrimiento del púlsar de Hulse y Taylor. Hacia 1960, Joseph Weber, de la Universidad de Maryland, construyó un detector formado por un cilindro de aluminio de dos metros de longitud y un metro de diámetro. Weber albergaba la esperanza de que los modos resonantes del instrumento fuesen excitados por el paso de ondas gravitacionales, las cuales quedarían registradas por medio de sensores piezoeléctricos.

Hoy en día, los principales proyectos que buscan detectar ondas gravitacionales de manera directa se basan en experimentos de interferometría láser. La idea consiste en enviar luz láser entre espejos, de modo que los haces sean reflejados en uno y otro sentido antes de interferir. Si la distancia entre los espejos variase, tal y como debería ocurrir ante el paso de una onda gravitacional, ello modificaría el patrón de interferencia. Este es el principio en el que se basa el interferómetro GEO600, del Instituto Albert Einstein de Hannover, donde se desarrollan numerosos de los aspectos técnicos que, en todo el mundo, emplean los experimentos de este tipo. Los brazos del instrumento, en cuyos extremos se sitúan los espejos, miden 600 metros de longitud.

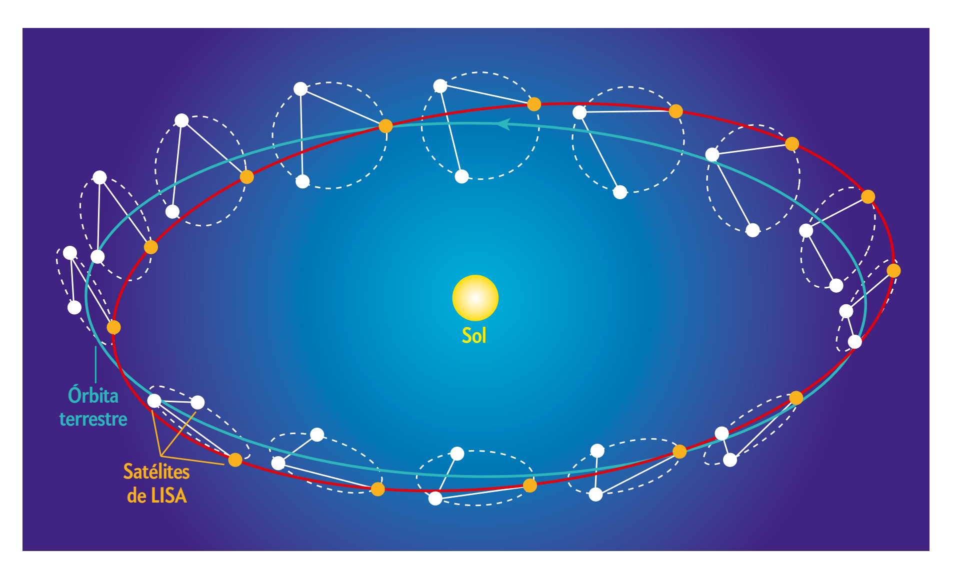
Los detectores LIGO I y II, en Washington y Luisiana, y Virgo, en la región italiana de Toscana, cuentan con brazos aún mayores, de hasta cuatro kilómetros de longitud. Gracias a su delicado diseño y a un buen aislamiento con respecto a las vibraciones sísmicas, estos interferómetros láser deberían poder observar ondas gravitacionales cuyo espectro se hallase comprendido entre los diez y algunos miles de hercios.

Los expertos creen que las primeras señales de ondas gravitacionales que detectarán los experimentos terrestres serán las producidas en una colisión de dos estrellas de neutrones o dos agujeros negros. En estos momentos, los detectores de LIGO están sometiéndose a una serie de mejoras técnicas. El nuevo proyecto, rebautizado con el nombre de LIGO Avanzado, tiene previsto retomar las observaciones hacia 2015. Los expertos creen que tal vez podría detectar varias colisiones de este tipo al año. A partir de los cálculos realizados en los diez casos conocidos de sistemas compuestos por dos estrellas de neutrones, se estima que en una galaxia típica tales choques deberían ocurrir una vez cada 10.000 años. Aunque se trata de un fenómeno cien veces menos probable que una explosión de supernova, su ventaja reside en que puede ser observado desde mucho más lejos.

También los modelos matemáticos que describen este tipo de colisiones han experimentado mejoras notables durante los últimos años. Desde el momento en que la señal gravitatoria alcance una frecuencia de unos diez hercios (lo que la pondría al alcance de los interferómetros láser), se estima que dos estrellas de neutrones deberían describir unas 10.000 órbitas en torno al centro de masas común antes de que, en apenas unos minutos, se produzca la colisión. La señal característica de un fenómeno así debería poder identificarse con gran claridad en los datos.

Sin embargo, los detectores terrestres de ondas gravitacionales se ven expuestos a limitaciones de varias clases. En primer lugar, no pueden aislarse por completo de las vibraciones sísmicas, motivo por el que no pueden observar frecuencias superiores a los diez hercios. Ello implica pasar por alto muchas de las posibles fuentes de ondas gravitacionales, como el púlsar doble o los agujeros negros supermasivos que, con masas varios millones de veces mayores que la del Sol, residen en el centro de las galaxias. Cuando dos galaxias se fusionan, la colisión de sus respectivos agujeros negros centrales debería generar ondas gravitacionales cuya frecuencia se estima en algunos milihercios.

Con el objetivo de detectar dichas frecuencias, la Agencia Espacial Europea trabaja en el diseño del interferómetro espacial



La misión espacial LISA, un proyecto de la Agencia Espacial Europea, intentará detectar ondas gravitacionales por medio de tres satélites emplazados en los vértices de un triángulo equilátero de cinco millones de kilómetros de lado. A medida que su centro de masas describa una órbita heliocéntrica (a unos 50 millones de kilómetros de la Tierra) la configuración rotará sobre sí misma. Cada satélite emitirá dos haces láser que serán reflejados por las otras dos naves. Sendos interferómetros medirán las posibles variaciones en la longitud del recorrido provocadas por el paso de ondas gravitacionales.

SPEKTRUM DER WISSENSCHAFT SEGÚN NASA, JPL/CALTECH

LISA, el cual constaría de tres satélites dispuestos en los vértices de un triángulo de unos cinco millones de kilómetros de lado. Se espera que este proyecto, que podría entrar en funcionamiento hacia 2020, cubra el espectro de frecuencias comprendidas entre 0,1 milihercios y 0,1 hercios. Los cálculos indican que, en el régimen del milihercio, LISA detectará tal número de fuentes que no podrá resolverlas una por una; en su lugar, observará un fondo estocástico de ondas gravitacionales. Las fuentes más intensas a su alcance deberían corresponder a las colisiones de agujeros negros de entre 10.000 y 10 millones de masas solares. El radio de dichas observaciones podría incluir fenómenos que tuvieron lugar apenas 300 millones de años después de la gran explosión, lo que permitiría investigar la época de formación de las primeras galaxias.

BATERÍAS DE PÚLSARES

Con todo, existen agujeros negros que escaparán al intervalo de detección de LISA. En la actualidad contamos con indicios muy claros de que en el centro de algunas de las mayores galaxias habitan agujeros negros cuyas masas ascienden a miles de millones de veces la del Sol. Se cree que la galaxia elíptica M87, por ejemplo, alberga un agujero negro de 7000 millones de masas solares; tan descomunal que su radio supera al de nuestro sistema solar. Las ondas gravitacionales generadas en la colisión de dos agujeros negros de semejantes dimensiones se hallarían en la banda de los nanohercios. ¿Qué experimentos podrían detectar tales frecuencias?

Por fortuna, la naturaleza se ha encargado de poner a nuestra disposición instrumentos de ese tipo: los púlsares. Si, en su camino hacia la Tierra, sus señales atravesasen una región del espaciotiempo deformada por la acción de ondas gravitacionales, los tiempos de llegada de los pulsos deberían sufrir ligeras variaciones. A partir de esos datos, deberían poder inferirse las características de las ondas gravitacionales. Este principio no resulta tan distinto del que emplean los detectores GEO600 o LIGO. También aquí, lo que se comprueba es si el tiempo que tarda la luz en recorrer una distancia determinada varía o no como consecuencia del paso de una onda gravitacional. La diferencia reside en que, si la fuente de luz nos la proporciona un púlsar, el brazo del «instrumento» debe medir varios miles de años luz.

A fin de hacernos con una descripción simple —aunque no del todo correcta— de lo que ocurre, podemos imaginar que la distancia de la Tierra al púlsar se ve modificada por la acción de la onda gravitacional. Como consecuencia de los efectos de polarización, los tiempos de llegada de los pulsos procedentes de dos fuentes dependerán del ángulo que formen sus respectivas líneas de visión desde la Tierra. Así, mientras las señales de un púlsar llegarían antes de lo debido, las del otro se retrasarían. Por tanto, las oscilaciones en los tiempos de llegada se hallarían correlacionadas con la posición de las fuentes en el cielo. Con ayuda de los mayores radiotelescopios del mundo, podrían efectuarse mediciones muy precisas de los púlsares más regulares (hoy se conocen una treintena que podrían resultar de utilidad a tal efecto) a fin de detectar dichas oscilaciones y, con ello, las ondas gravitacionales que las provocan.

Tales disposiciones de púlsares reciben el nombre de «baterías para la medición de la cadencia de púlsares» (PTA, por *pulsar timing arrays*). Su sensibilidad aumenta con el tiempo de observación, lo cual permite incrementar también el espectro de frecuencias observables. A tenor de las simulaciones realizadas por nuestros colaboradores del Instituto Albert Einstein de Potsdam-Golm, el PTA con el que trabaja nuestro grupo de investigación tal vez detecte las primeras señales de ondas gravitacionales de aquí a entre cinco y diez años. Estas podrían proceder de una sola fuente de gran intensidad o, como parece más probable, en forma de un fondo de ondas gravitacionales emitido por toda una variedad de fuentes menos intensas.

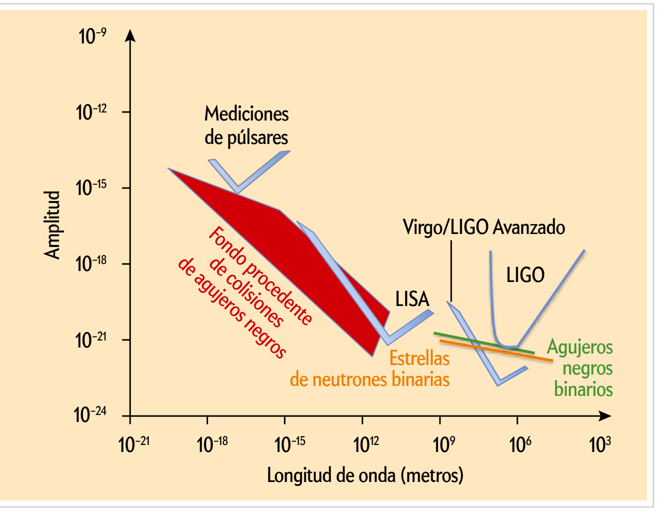
Al entrar en tales consideraciones, no debemos olvidar que los púlsares no emiten señales a intervalos absolutamente regulares. Por tanto, la pregunta reside en cuáles lo hacen a un ritmo lo bastante estable como para resultar de utilidad en los experimentos. En púlsares jóvenes suele detectarse cierto ruido intrínseco a la señal, el cual hasta hace poco se creía debido a variaciones aleatorias. Sin embargo, hoy sabemos que dichas perturbaciones tienen su origen en los procesos físicos de la magnetosfera del púlsar; en particular, en las variaciones del flujo de partículas que emanan de ella. Este fenómeno provoca oscilaciones en el ritmo de frenado, las cuales influyen en la forma de las señales de radio. Por tanto, a partir de las características del pulso, puede determinarse con mayor precisión el ritmo de frenado y, con ello, mejorar la calibración de estos relojes cósmicos.

En la actualidad, los investigadores están empleando los mayores radiotelescopios del mundo a fin de hallar púlsares aún más intensos. En esta búsqueda participan instrumentos como el telescopio de 300 metros del observatorio de Arecibo, en Puerto Rico; el telescopio de 100 metros de Green Bank, en EE.UU.,

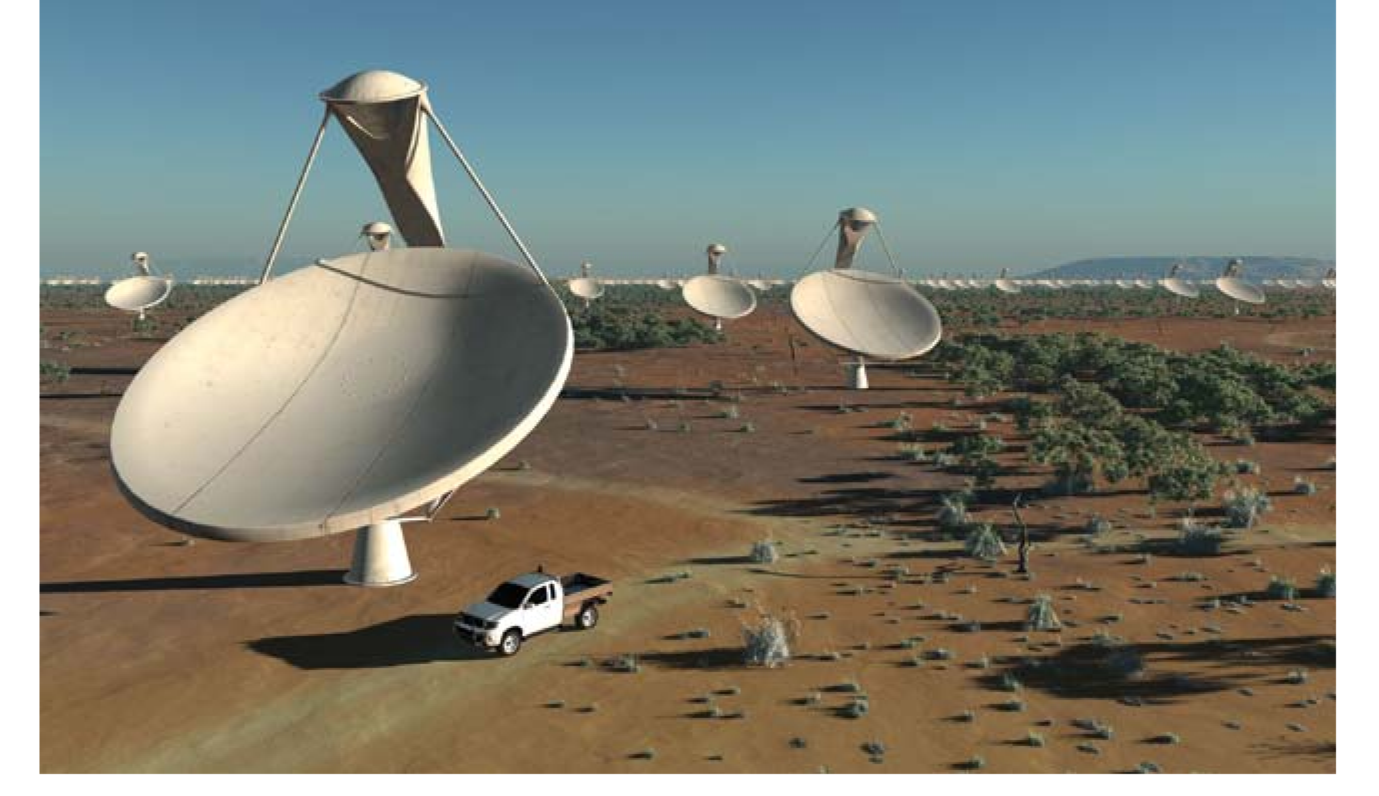
Experimentos

Al contrario que los interferómetros terrestres, como LIGO o Virgo, las primeras señales de ondas gravitacionales que detecten las observaciones astronómicas basadas en púlsares probablemente no correspondan a una fuente individual, sino a un fondo estocástico generado por sistemas binarios dispersos, como agujeros negros o estrellas de neutrones en colisión.

Las líneas azules del diagrama muestran el umbral de detección de cada experimento en función de la frecuencia y amplitud de las ondas. El dominio situado por encima de cada línea corresponde a la región que ya ha sido explorada. A su vez, las mediciones de precisión del fondo cósmico de microondas (*no representado*) podrían servir para detectar ondas gravitacionales de longitud de onda aún mayor.



MICHAEL KRAMER



La Batería de Telescopios del Kilómetro Cuadrado, un proyecto internacional cuya construcción se prevé que comience dentro de unos años en Australia y Sudáfrica, dispondrá de unas 3000 antenas parabólicas que sumarán un área colectora de un kilómetro cuadrado. Entre otros objetivos, este radiotelescopio logrará mejoras sustanciales en las medidas de precisión de las señales de púlsares (*recreación artística*).

OFICINA DE DESARROLLO DEL PROGRAMA SKA/TDP/DRAO/PRODUCCIONES ASTRONÓMICAS SWINBURNE

o el de 64 metros de Parkes, en Australia. En Europa destacan el instrumento de 100 metros de Effelsberg, en Alemania; las antenas del observatorio de Westerbork, en los Países Bajos (que en conjunto equivalen a un radiotelescopio de 94 metros de diámetro); el telescopio Lovell de 76 metros, en Inglaterra, y el telescopio de tránsitos de la ciudad francesa de Nançay, equivalente a un instrumento de 100 metros. Junto con el instrumento de 64 metros de Cerdeña, esta red de telescopios tomará parte en la Gran Batería Europea para la Observación de Púlsares (LEAP, por sus siglas en inglés), un proyecto que prevé sincronizar todos los observatorios a fin de que, en conjunto, operen como un gran telescopio de casi 200 metros.

UN TELESCOPIO DE UN KILÓMETRO CUADRADO

El proyecto LEAP forma parte de la Batería Europea para la Medición de la Cadencia de Púlsares (EPTA). En 2011, esta colaboración ya obtuvo una cota superior sobre la amplitud el fondo de ondas gravitacionales. El hecho de que la señal deba estar por debajo de cierto valor umbral permite imponer restricciones a los procesos de colisión de galaxias en el universo temprano.

Con todo, incluso en un marco tan amplio como el de las colaboraciones internacionales, la sensibilidad de los telescopios actuales apenas permitirá detectar algo más que un fondo de ondas gravitacionales. En particular, las características físicas de las ondas gravitacionales no pueden determinarse con precisión. Con el objetivo de remediar esta situación, astrónomos de más de una veintena de países trabajan en estos momentos en el diseño del que será el mayor radiotelescopio jamás construido: la Batería de Telescopios del Kilómetro Cuadrado (SKA, por sus siglas en inglés).

El proyecto SKA contempla utilizar millares de pequeñas antenas de manera simultánea, de modo que la superficie total de observación ascienda a un kilómetro cuadrado. La señal medida con este instrumento podría resultar hasta cien veces mayor que el ruido de fondo, lo que permitiría determinar las propiedades físicas de las ondas detectadas. En tal caso, podríamos responder a algunas de las apasionantes preguntas que nos plantea la naturaleza de la gravedad; entre ellas, las relativas a la existencia del gravitón, la hipotética partícula mediadora de la interacción gravitatoria (el análogo gravitatorio de los fotones, que transmiten el electromagnetismo, o de los gluones, los portadores de la interacción nuclear fuerte).

Por otro lado, la batería de telescopios SKA nos permitiría ir más allá del fondo estocástico de ondas gravitacionales y detectar fuentes individuales. Tal identificación sería posible gracias a que las ondas gravitacionales no solo perturban las propiedades del espaciotiempo en la vecindad de la Tierra, sino también en las cercanías del púlsar. Por tanto, si se conoce la distancia entre el púlsar y la Tierra con la precisión suficiente, las propiedades de la señal permitirían determinar la dirección de la fuente con respecto a ambos cuerpos. Al combinar esos datos, resulta posible deducir la localización de la fuente para, después, intentar contrastar su origen mediante señales electromagnéticas.

La astronomía de ondas gravitacionales nos abre posibilidades completamente nuevas para explorar el universo. Desconocemos la naturaleza de los hallazgos que nos depara el futuro, pero algo podemos afirmar con seguridad: los púlsares desempeñarán un papel de primer orden.

PARA SABER MÁS

Handbook of pulsar astronomy. D. R. Lorimer y M. Kramer. Cambridge University Press, 2005.

Traveling at the speed of thought: Einstein and the quest for gravitational waves. D. Kennefick. Princeton University Press, 2007.

The double pulsar system: A unique laboratory for gravity. M. Kramer y N. Wex en *Classical and Quantum Gravity*, vol. 26, pág. 073001, 2009.

Measuring the mass of solar-system planets using pulsar timing. D. J. Champion et al. en *The Astrophysical Journal Letters*, vol. 720, pág. L201, 2010.

Switched magnetospheric regulation of pulsar spin-down. A. Lyne et al. en *Science*, vol. 329, págs. 408-412, 23 de julio, 2010.

SOCIOBIOLOGÍA

Juegos de caparazones

Como el hombre, los cangrejos ermitaños y otros animales prosperan al aprovecharse de los bienes que otros dejan

Ivan Chase

Una temprana mañana de junio de 1986 me metí en una charca dejada por la bajamar en Long Island ayudándome de una caja vacía de botellas de leche: en cuclillas sobre ella, tiré al agua una concha de caracol vacía y aguardé. Minutos después, un pequeño cangrejo ermitaño se encaminó hacia ella rozando el agua, introdujo las pinzas en su abertura para medir el interior y la giró varias veces para comprobar que no estuviera agujereada. En un abrir y cerrar de ojos, el cangrejo se deshizo de su viejo caparazón e introdujo su vulnerable abdomen en la concha que yo había tirado. Satisfecho con el cambio, se alejó tranquilamente dejando abandonado su antiguo hogar, que se le había quedado pequeño. Al cabo de un rato, otro cangrejo ermitaño descubrió la concha deshabitada y, tras la inspección de rigor, se marchó deprisa con su nueva casa a cuestas. Diez minutos después, un tercer ermitaño encontró la segunda concha abandonada y se apropió de ella una vez se hubo despojado de su pequeño caparazón agujereado.

Tal vez resulte extraño, pero este representó uno de los momentos más felices de mi vida como investigador. Durante casi diez años me había estado preguntando si los cangrejos ermitaños se alojaban en las conchas que habían dejado sus congéneres. Ahora, por fin, tenía la respuesta. Acababa de presenciar un animal recurriendo a lo que los sociólogos y economistas denominan una «cadena de vacantes», un método organizado para intercambiar recursos en el que cada individuo se aprovecha de una posesión abandonada por otro. A pesar de contar con un cerebro y un sistema nervioso sencillos, los cangrejos ermitaños han desarrollado conductas sociales complejas para sacar el máximo partido de las cadenas de vacantes.



ADAM VOORHES (*fotografías*)



Con toda probabilidad, pronto se descubrirá ese fenómeno en otros animales; ya existen indicios de que lapas, langostas, peces, pulpos y picos también se turnan para conseguir un hogar mejor. El estudio de esas especies tal vez nos ayude a reconocer y mejorar las cadenas de vacantes que existen en las sociedades humanas y nos aporte nuevas ideas para hacer frente a varios problemas, como la escasez de viviendas en Manhattan o el tráfico de drogas. El hecho de que los cangrejos ermitaños y otros animales dependan de las cadenas de vacantes también está cambiando el modo de pensar de los sociólogos acerca de las estrategias económicas. Por lo que parece, algunas tácticas no precisan una inteligencia o un altruismo de tipo humano, sino que resultan mucho más universales.

CANGREJOS EN LISTA DE ESPERA

Entre junio y septiembre de 1986, y durante el verano siguiente, llevé a grupos de estudiantes a la playa West Meadow de Long Island para observar las cadenas de vacantes de *Pagurus longicarpus*, un cangrejo ermitaño común en la costa oriental de Estados Unidos. Quería descubrir hechos básicos sobre las cadenas, como el número medio de individuos que adquieren conchas nuevas en una secuencia y si la disponibilidad de caparazones más grandes da lugar a cadenas más largas. Después de una mañana de observaciones, llevamos al laboratorio varios crustáceos y los sumergimos en agua caliente para que se relajaran y resultara más fácil sacarlos de las conchas sin causarles daño. Una vez fuera, emplazamos a cada cangrejo en un tanque de agua fría que contenía un gran surtido de caparazones vacíos. Cuando habían escogido uno, los volvíamos a soltar en la playa.

Descubrimos que los cangrejos solían buscar caparazones más grandes y que las cadenas que iniciamos con conchas grandes eran más largas que las empezadas con pequeñas, lo que permitía a un mayor número de cangrejos cambiar de hogar. El número de crustáceos que se mudaron en nuestras cadenas osciló entre 2 y 3, con un valor medio de 2,5. Algunas personas no pudieron ocultar su desilusión al conocer esa cifra, porque esperaban un número mayor: unos 10, o hasta 50 cangrejos por cadena. Les dije que el valor era elevado si se interpretaba de forma correcta. Normalmente, cuando pensamos en una competición, damos por sentado que un solo individuo o grupo ganará y los demás competidores perderán. Pero en una cadena de vacantes, incluso en una corta, varios individuos obtienen una ganancia. Aunque solo dos cangrejos consiguieran nuevas conchas, esa cifra representa el doble del número de individuos que alcanzan un recurso en una competición ordinaria.

Después de publicar nuestros estudios, otros investigadores descubrieron cadenas de vacantes en otras especies de cangrejos ermitaños, como los cangrejos de tierra caribeños, que a veces se venden como mascotas en las tiendas de animales. Uno de los ejemplos más extraños lo protagoniza un caracol que caza

EN SÍNTESIS

Sociólogos y economistas utilizan el término «cadena de vacantes» para describir un intercambio secuencial de recursos que beneficia a todos los integrantes de la cadena.

En las últimas décadas se han recopilado datos que indican que los cangrejos ermitaños, y posiblemente otros animales, utilizan también las cadenas de vacantes.

El estudio del comportamiento de esos animales podría ayudarnos a mejorar la distribución de recursos entre los humanos, ya sean viviendas, coches o empleos.

Ivan Chase es catedrático emérito de la Universidad Stony Brook, donde dirige el Laboratorio para el Estudio de la Organización Social. Investiga las jerarquías de dominio y la distribución de los recursos escasos, entre otros temas de sociología, ecología y evolución.



otras especies de caracoles, entre ellas algunas cuyas conchas son muy apreciadas por los cangrejos ermitaños. Cuando el caracol depredador atrapa una víctima, perfora la concha con su lengua rasposa e inyecta enzimas digestivas a través del orificio. Los cangrejos que se hallan en las cercanías comienzan a acudir atraídos por el olor que desprende el caracol herido. Cuando el depredador por fin consigue sacar a su presa del caparazón, a veces hasta una hora después, el cangrejo más próximo se apodera de él. Inmediatamente otro se apropia de la concha antigua del primero, y así uno tras otro. En lugar de las meticulosas inspecciones de rigor que observamos en Long Island, los cangrejos que aguardan con paciencia la muerte del molusco toman una decisión en cuestión de segundos y escogen su nuevo hogar solo por lo que han visto. Todos los integrantes de la cadena de vacantes se benefician, pero la inmediatez de la competición lo acelera todo.

En fecha reciente se han realizado otros descubrimientos sorprendentes sobre las cadenas de vacantes en los cangrejos ermitaños. Resulta que el animal utiliza como mínimo dos tipos de cadenas: síncronas y asíncronas. En el segundo tipo (el observado por nosotros), un solo cangrejo ocupa una concha vacante en una vez. En cambio, en las cadenas síncronas los cangrejos esperan su turno, por orden de tamaño, a que un primer congénere examine la concha vacía. Cuando este se aloja en ella, el siguiente ocupa su antigua morada, y así sucesivamente, todo en cuestión de segundos. Estas conductas tan bien orquestadas sugieren un conocimiento social complejo, sobre todo si tenemos en cuenta que se trata de un animal con un cerebro pequeño y simple.

Pocos estudios publicados abordan las cadenas de vacantes en otros animales, pero las observaciones preliminares indican que la estrategia resulta habitual en numerosos seres vivos. Al igual que los cangrejos ermitaños, varias especies de pulpos y de peces cíclidos viven en caracolas vacías que defienden como propias. Las lapas se aferran con fuerza en los huecos de las rocas y el pez payaso busca cobijo entre las anémonas de mar. Las langostas y los bogavantes se refugian en las oquedades de las rocas o entre los corales. Y los picos taladran su nido en los troncos de los pinos. A medida que crecen y envejecen, todos ellos buscan refugios más acogedores, dejando lugares vacantes para otros animales. Las personas hacen exactamente lo mismo.

CADENAS HUMANAS

Los primeros estudios sobre las cadenas de vacantes en los humanos se realizaron en los años sesenta del siglo XX en Manhattan, a menos de cien kilómetros de la playa donde presencié el intercambio de conchas entre los cangrejos ermitaños. El difunto Frank Kristof, entonces jefe de planificación e investigación del comité de vivienda y desarrollo urbanístico de la Ciudad de Nueva York, se percató de que la construcción de nuevos apartamentos iniciaba reacciones en cadena que permitían a las familias mudarse de pisos pequeños y precarios a inmuebles más grandes y acordes con sus necesidades. Kristof descubrió que por cada nueva vivienda construida, cerca de 2,4 familias se trasladaban a pisos mejores. Siguiendo su trabajo, otros investigadores describieron cadenas de vacantes inmobiliarias en Estados Uni-

dos y otros países. Uno de los estudios más exhaustivos, que examinó el mercado nacional de viviendas, descubrió que la cadena propiciaba la mudanza de unas 3,5 familias en promedio.



Pero Kristof no era el único interesado en esas secuencias en los años sesenta. Harrison White, entonces catedrático de sociología de la Universidad Harvard y creador del término «cadena de vacantes», descubrió por su cuenta ese fenómeno en los colectivos religiosos, en concreto en las congregaciones de metodistas, presbiterianos y episcopalianos. Observó que la jubilación o el fallecimiento de un predicador, la consagración de una nueva iglesia o la decisión de cambiar de carrera de un pastor generaban cadenas de vacantes.

Algunas pautas de nuestra vida social son muy básicas y las presentan también varios animales primitivos

A partir del trabajo de White, sociólogos y economistas investigaron las cadenas en diversas ocupaciones: entrenadores de rugby, policías, oficiales de las fuerzas armadas y bandas de narcotraficantes. White y otros investigadores constataron que entre 2,5 y 3,5 personas suelen cambiar de trabajo en las secuencias, por lo general para mejor. Pero ese efecto dominó no siempre resultaba conveniente. El estudio sobre el tráfico de drogas reveló que cuando la policía detenía a un traficante importante, creaba sin quererlo largas cadenas de vacantes que posibilitaban el ascenso de numerosos miembros de la organización ilícita.

Las cadenas se forman también cuando se compran algunos tipos de bienes de consumo masivo, en especial automóviles. No conozco ningún estudio reciente sobre el tema, pero algunos trabajos antiguos señalan en esa dirección. En 1941, el profesor de empresariales Theodore H. Smith llevó a cabo un extenso estudio del mercado de coches nuevos y usados en Estados Unidos. Y aunque no empleó el término «cadena de vacantes», llegó a la conclusión de que tales intercambios resultaban fundamentales para la industria del automóvil. A principios del siglo xx, los vendedores descubrieron que, para vender coches nuevos con más facilidad, tenían que pedir a los compradores que entregaran a cambio su vehículo antiguo para revenderlo a otros clientes. Con los datos de Smith, calculo que en aquella época unas tres personas adquirían un coche en una cadena típica.

¿Por qué las cadenas de vacantes suelen beneficiar a unos tres individuos o grupos en especies tan dispares como el cangrejo ermitaño y el ser humano? Según mi opinión, existe una correspondencia aún desconocida entre la demografía de ambas especies que explica dicho efecto: tal vez influyan las tasas de natalidad y mortalidad, o quizás el ritmo de producción y consumo de los nuevos recursos. Pero solo se trata de un presentimiento. Lo que sí resulta evidente es que las cadenas de vacantes de los animales y las personas no existirían si no hubiera algún tipo de bien en desuso, un bien que presenta un conjunto claro de propiedades.

LOS PRINCIPIOS

White definió las propiedades de esos recursos. En primer lugar, son codiciados y difíciles de conseguir; empleos, coches y casas no suelen hallarse desocupados y en abundancia, a la espera de que alguien se los agencie. En segundo lugar, constituyen un tipo de bien que es ocupado o adquirido por un solo individuo o grupo familiar, un bien que queda libre cuando se consigue otro nuevo. Por último, y la más importante, un recurso no puede tomarse a menos que quede vacante. White pensaba en personas, pero las cadenas de los cangrejos ermitaños comparten las mismas características. Las conchas escasean y cada una de ellas solo puede ser ocupada por un cangrejo. Casi todos los cangrejos adultos poseen un caparazón que abandonan cuando adquieren uno nuevo, pero antes de mudarse a él deben aguardar a que quede vacío.

Centrarse en los recursos en sí mismos supone volver del revés la forma habitual de examinar su distribución. Los economistas y los sociólogos suelen pensar sobre quién consigue qué y si la distribución de los bienes valiosos es justa. Nosotros nos preguntamos, entre otras cosas, qué importancia tienen la inteligencia, la raza, la educación o el estatus socioeconómico a la hora de conseguir un trabajo o una vivienda. Estas preguntas, si bien pertinentes, a veces impiden descubrir otros procesos que influyen en la distribución de los recursos y pueden ocultar rasgos comunes entre especies.

Dado que tanto en las personas como en los animales las cadenas de vacantes están definidas por el tipo de recurso, y no por el tipo de individuos que participan en ellas, el estudio de los cangrejos ermitaños podría esclarecer el modo de maximizar la redistribución de los recursos en las poblaciones humanas. De manera experimental se podría ofrecer a un grupo de cangrejos ermitaños conchas de distintos tamaños y en diferente estado; alterar sus tasas de natalidad o mortalidad y la «edad de jubilación» añadiendo y retirando cangrejos, y, en general, manipularlos a ellos y a sus conchas para averiguar las situaciones que permiten prosperar a un mayor número de individuos con más rapidez. Al fin y al cabo, podemos manipular de forma ética a los cangrejos en modos que no podemos aplicar a las personas. Los humanos ya estamos empleando los animales para saber más sobre nosotros mismos: estudiamos las moscas de la fruta para aprender sobre nuestra genética; las ratas y los ratones, para investigar algunas enfermedades humanas, y las babosas de mar, para conocer la base molecular del aprendizaje y la memoria. Los experimentos con los cangrejos ermitaños podrían convertirse en uno de los primeros métodos para modelizar los sistemas sociales humanos con animales poco complejos.

No hace mucho volví a la playa donde comencé mis observaciones, en busca de inspiración. Anduve hasta la charca y observé los cangrejos ermitaños que caminaban con lentitud por la arena del fondo. Los contemplé lleno de gratitud. Lo que comenzó como un pasatiempo para satisfacer mi curiosidad ha acabado desvelando ideas y vínculos que jamás pude imaginar aquel primer día en Long Island. Y, por encima de todo, he disfrutado aprendiendo que algunas pautas de nuestra vida social resultan tan básicas, que incluso las presentan varios animales primitivos.

PARA SABER MÁS

Vacancy chains. Ivan D. Chase en *Annual Review of Sociology*, vol. 17, págs. 133-154, 1991.

Forging the vacancy chain: Law enforcement efforts and mobility in criminal economies. H. R. Friman en *Crime, Law & Social Change*, vol. 41, págs. 53-77, 2004.

Social context of shell acquisition in *Coenobita clypeatus* hermit crabs. R. D. Rotjan, J. R. Chabot y S. M. Lewis en *Behavioral Ecology*, vol. 21, n.º 3, págs. 639-646, 2010.

por Jean-Michel Courty y Édouard Kierlik

Jean-Michel Courty y **Édouard Kierlik** son profesores de física en la Universidad Pierre y Marie Curie de París.



El fundíbulo del futbolista

Para lograr una transferencia eficiente de energía, los artilleros de la Edad Media empleaban, sin saberlo, un péndulo doble. Hoy, futbolistas y golfistas hacen lo mismo

Los futbolistas profesionales pueden llegar a comunicar al balón una velocidad de 120 o 130 kilómetros por hora. Para llevar a cabo semejante proeza, ejecutan un movimiento muy concreto en el que todo el esfuerzo lo ejerce el muslo mucho antes de que se produzca la patada: cuando el pie entra en contacto con el balón, la pierna se encuentra estirada y con los músculos relajados. Este mecanismo, muy eficiente a la hora de transmitir la energía muscular a la pelota, se emplea en numerosos dispositivos; entre ellos, los fundíbulos medievales.

Ya se trate de fútbol o de golf, el objetivo del deportista consiste en comunicar, con su sola fuerza muscular y en un único gesto, la máxima velocidad al balón o a la pelota. En ambos casos, el balón de fútbol (400 gramos) o la pelota de golf (45 gramos) son más ligeros que la parte rígida que los golpea (el pie o la cabeza del palo). Tras el impacto, el proyectil adquiere una velocidad igual a la del objeto que lo golpea multiplicada por cierto coeficiente. Debido a la naturaleza «blanda» del golpe, dicho coeficiente resulta algo mayor que la unidad. El cociente entre la masa del proyectil y la del objeto que lo impulsa no desempeña aquí un papel relevante.

Así pues, importa poco que se trate del pie, el conjunto pie-pantorrilla o el conjunto pie-pantorrilla-muslo lo que esté en movimiento en el momento del golpe. Lo que buscamos es imprimir al pie la máxima velocidad. A tal fin, futbolistas y golfistas recurren a uno de los dispositivos mecánicos más eficaces: dos brazos articulados que giran con libertad uno con respecto al otro.

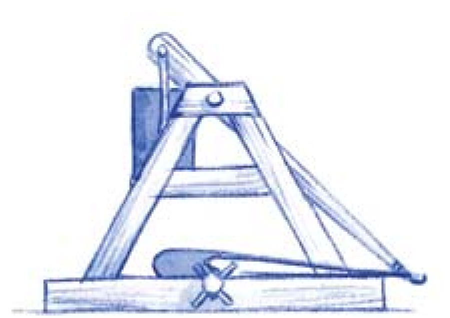
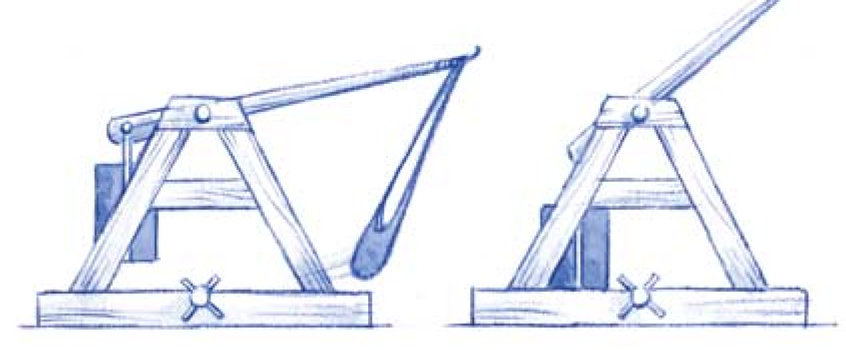
Pensemos en un tiro de falta. Al principio, la pierna del jugador se encuentra plegada, con el pie retirado hacia atrás. En el curso del movimiento, el muslo gira en torno a la cadera y la pierna se despliega, de forma que, al impactar contra el balón, se encuentra casi recta. Lo mismo ocurre con el *swing* del golfista: al imprimir el golpe a la pelota, el brazo y el palo se encuentran alineados. Durante la primera fase del movimiento, sin embargo, el ángulo formado por el muslo y la pantorrilla, o el brazo y la maza, permanece constante.

Catapultas y fundíbulos

¿Resulta óptima la técnica que acabamos de describir? De nada sirve mantener la pierna estirada durante todo el movimiento: dado que lo único que importa es la velocidad del pie, acelerar toda la pierna supondría un despilfarro de energía. Una pierna estirada puede compararse a una catapulta. Cuando esta envía la bala, casi toda la energía suministrada se ha convertido en energía cinética del brazo. Al proyectil solo se le cede entre el 5 y el 10 por ciento de dicha energía.

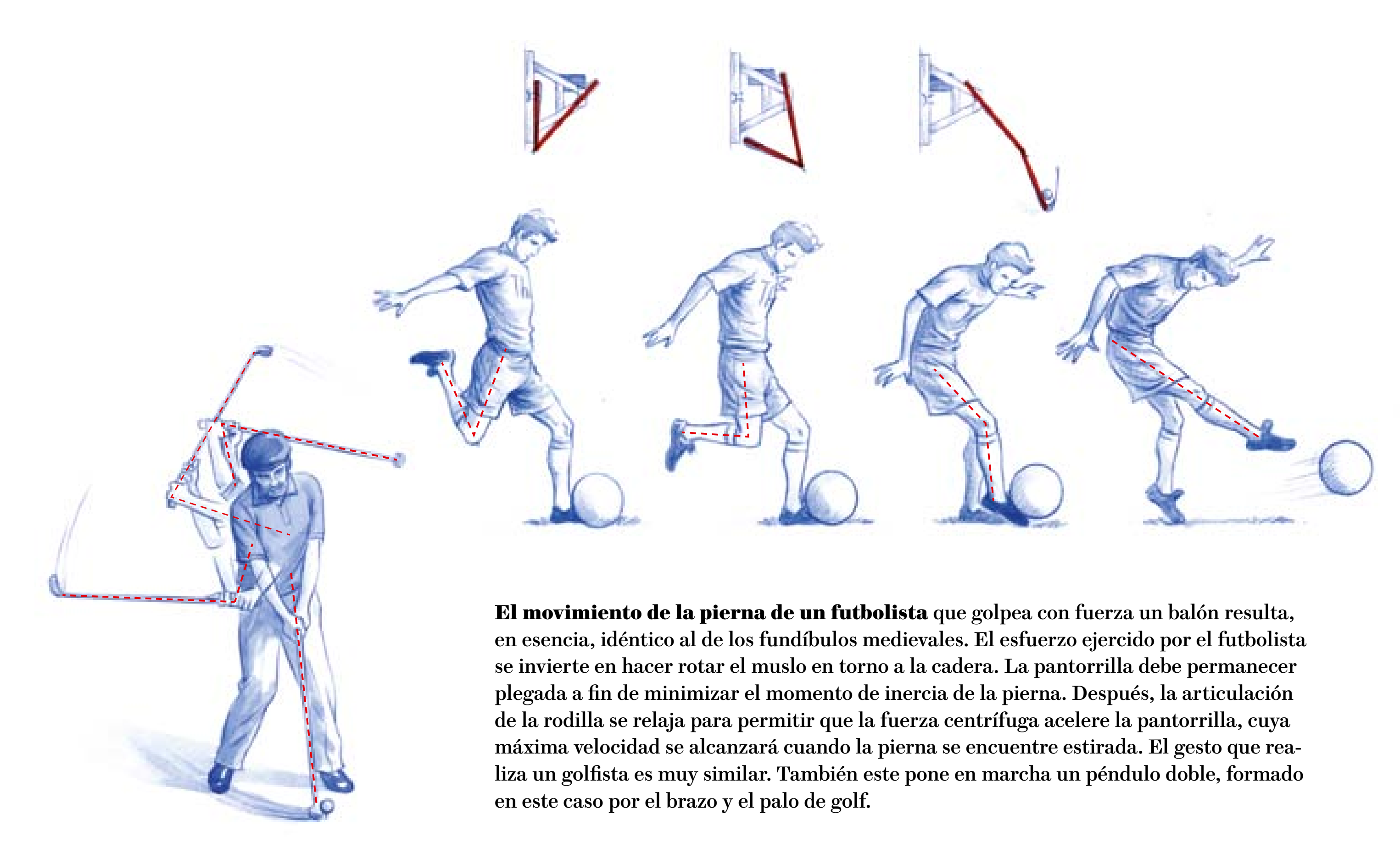
Mucho más eficientes resultaban los fundíbulos, o trabuquetes. Estas piezas de artillería medieval podían lanzar un proyectil de 200 kilogramos a 200 metros de distancia. Constaban de un contrapeso de varias toneladas, el cual accionaba una palanca a la que se había amarrado una honda que sujetaba el proyectil. Al soltar el contrapeso desde una posición elevada, su caída hacía bascular la palanca y aceleraba en bloque toda la carga.

En el fundíbulo, dado que la articulación entre la palanca y la honda permite que esta última gire con total libertad, la fuerza centrífuga que actúa sobre el proyectil hace rotar la honda en torno a la articulación. El artefacto se ajusta para que, en el momento en que se libera la bala, honda y palanca se encuentren alineadas. Gracias a ese mecanismo de doble brazo (un péndulo doble), el proyectil adquiere entre el 60 y el 80 por ciento de la energía inicial (igual a la energía potencial gravitatoria del contrapeso): casi diez veces más que con una catapulta.

En el fundíbulo, la caída de un contrapeso hace girar una palanca a la que está amarrada una honda con el proyectil. La fuerza centrífuga confiere al conjunto formado por la honda y el proyectil una velocidad mucho mayor que la de la palanca. Cuando la bala sale despedida, la palanca ha cedido energía cinética y la honda ha alcanzado una velocidad próxima a la máxima posible.

BRUNO VACARO



El movimiento de la pierna de un futbolista que golpea con fuerza un balón resulta, en esencia, idéntico al de los fundíbulos medievales. El esfuerzo ejercido por el futbolista se invierte en hacer rotar el muslo en torno a la cadera. La pantorrilla debe permanecer plegada a fin de minimizar el momento de inercia de la pierna. Después, la articulación de la rodilla se relaja para permitir que la fuerza centrífuga acelere la pantorrilla, cuya máxima velocidad se alcanzará cuando la pierna se encuentre estirada. El gesto que realiza un golfista es muy similar. También este pone en marcha un péndulo doble, formado en este caso por el brazo y el palo de golf.

BRUNO VACARO

¿Por qué resulta tan eficiente un dispositivo articulado? Supongamos que entregamos cierta cantidad de energía a la primera barra mientras la segunda está plegada. Esta última se acelerará a causa de la fuerza centrífuga. Su energía la extrae de la primera barra, la cual se irá frenando. Si se eligen con acierto las masas y las longitudes, la velocidad de la primera barra se anulará en el momento en que ambas se encuentran alineadas. En ese instante, la segunda barra ha acaparado toda la energía inicial, por lo que, si es mucho más ligera que la primera, adquirirá una velocidad de rotación mucho mayor. Nótese que, al poner en marcha el proceso, solo se comunica energía a la primera barra: desplegar el brazo articulado no requiere ningún esfuerzo, ya que de ello se encarga la fuerza centrífuga.

Al igual que ocurre en el fundíbulo, la pantorrilla del futbolista posee, al impactar contra el balón, una velocidad de rotación mucho mayor que la del muslo. Las grabaciones de vídeo muestran que, mientras la pantorrilla gira a una velocidad de 5,5 revoluciones por segundo, el muslo lo hace al ritmo de 1 vuelta por segundo.

¿Cómo lo logra el futbolista? En la primera fase del movimiento, mantiene la pierna flexionada. El ángulo entre el muslo y la pantorrilla apenas varía: así, el par de fuerzas muscular acelera el conjunto de manera más eficaz, ya que el momento de inercia con respecto a la cadera se reduce. Durante ese tiempo, la fuerza centrífuga aumenta y tiende a abrir el ángulo que forman el muslo y la pantorrilla. Llega un momento en que esa fuerza contrarresta la inercia de la pantorrilla. Si el jugador relaja en ese instante los músculos que mantienen la pierna flexionada, la pantorrilla sufrirá una fuerte aceleración y el muslo se frenará de manera considerable.

Un jugador entrenado puede incluso retrasar el momento en que relaja la pierna por completo, lo que favorece la transferencia de momento cinético del muslo a la pantorrilla. A fin de maximizar la velocidad lineal del pie, para una velocidad de rotación dada hace falta un brazo de palanca lo más largo posible. Por ello, el jugador intentará que, en el momento del impacto, la pierna se encuentre en una posición recta.

Músculos y fuerza centrífuga

La comparación con el fundíbulo permite entender por qué estirar la pierna no requiere ningún esfuerzo: basta con controlar una distensión que se produce de modo natural. Por tanto, cuando el futbolista se encuentra frente al balón, debe imaginar que es su pie lo que lanza. Si la velocidad del pie alcanza los 60 kilómetros por hora (lo que implica que el muslo se mueve mucho más despacio), el balón saldrá despedido con una velocidad aproximada de unos 100 kilómetros por hora.

La mecánica de un *swing* de golf o de un servicio de tenis resulta similar. El esfuerzo lo ejercen el tronco y los brazos. En cambio, las muñecas deben permanecer relajadas y limitarse a controlar la posición y la orientación de la cara del palo o de la raqueta. Los principios son siempre los mismos: tensar los músculos motores, aprovechar las articulaciones del cuerpo para evitar las aceleraciones en bloque y concentrar la velocidad en la parte que golpea, relajando los músculos para dejar que la fuerza centrífuga haga el trabajo.

PARA SABER MÁS

The biomechanics of soccer. A review. A. Lees y L. Nolan en *Journal of Sports Sciences*, vol. 16, págs. 211-234, 1998.

Siege engine dynamics. M. Denny en *European Journal of Physics*, vol. 26, págs. 561-577, 2005.

por Alejandro Pérez Carballo

Alejandro Pérez Carballo es investigador de filosofía en la Universidad de California del Sur.



Eventos posibles de probabilidad cero

El análisis no estándar y la teoría de la probabilidad

Imagine que se dispone a lanzar una moneda corriente una sola vez. La probabilidad de que salga cara será igual a 1/2. Si efectúa dos lanzamientos, la probabilidad de obtener dos caras ascenderá a 1/4. En general, si lanza una moneda n veces, la probabilidad de obtener n caras será igual a $1/2^n$.

Considere ahora lo que ocurriría al efectuar un número infinito de lanzamientos. ¿Cuál sería la probabilidad de obtener cara en cada uno de ellos? Desde luego, una serie infinita de caras se antoja muy improbable. Es más: podemos concluir que, para cualquier número natural k, la probabilidad de que la moneda salga cara un número infinito de veces ha de ser inferior a $1/2^k$.

Para ver por qué, considere un número k fijo; por ejemplo, 253. La probabilidad de obtener cara 253 veces seguidas asciende a $1/2^{253}$. Para conseguir un número infinito de caras, los primeros 254 lanzamientos deberán caer cara; por tanto, necesitaremos que ocurra un evento cuya probabilidad es menor que $1/2^{253}$ (a saber, uno de probabilidad $1/2^{254}$).

Así pues, parece que la probabilidad de obtener una serie infinita de caras debería ser cero. Ello se debe a que la probabilidad de cualquier suceso ha de estar dada por un número real comprendido entre 0 y 1, y, para cualquier número real r mayor que cero, siempre existirá algún número natural k tal que $0 < 1/2^k < r$. De esta manera, la probabilidad de obtener una serie infinita de caras resultará siempre menor que cualquier número real positivo, lo que parece indicar que solo puede ser nula.

Pero no cabe duda de que, si bien resulta muy improbable, efectuar infinitos lanzamientos y obtener cara en cada uno de ellos constituye un suceso *posible*. Por tanto, tenemos un evento que bien podría ocurrir pero que, sin embargo, tiene probabilidad cero.

Sucesos equiprobables

El problema no se limita a una sucesión infinita de caras. Toda serie infinita (por ejemplo, cara, cruz, cara, cruz, cara, cruz...) ha de tener probabilidad cero. El lector puede comprobar que el razonamiento anterior se aplica también a este caso.

En general, siempre que consideremos un conjunto infinito de eventos incompatibles (es decir, tales que si ocurre uno de ellos, el otro no puede suceder) y equiprobables, habremos de concluir que la probabilidad de cada uno de ellos ha de ser nula. Esto se sigue de uno de los principios fundamentales de la teoría de la probabilidad: si A y B son dos eventos incompatibles, entonces la probabilidad de que suceda A o de que suceda B es igual a la probabilidad de A más la probabilidad de B.

Por ejemplo, si tiramos una moneda dos veces, la probabilidad de que el primer lanzamiento caiga cara y el segundo cruz asciende a 1/4. Igualmente, la probabilidad de obtener una cruz en el primer lanzamiento y una cara en el segundo será asimismo igual a 1/4. Por tanto, la probabilidad de obtener una sola cara (bien en el primer lanzamiento, bien en el segundo) será igual a 1/4 + 1/4 = 1/2.

Consideremos ahora un conjunto infinito de eventos incompatibles y equiprobables: A_1, A_2, A_3, etcétera, y supongamos que la probabilidad de cada uno de ellos viene dada por un número m mayor que cero. Sea n^* el menor número natural tal que $m > 1/n^*$. La probabilidad del evento:

$$A_1 \text{ o } A_2 \text{ o } \dots \text{ o } A_{n^*} \text{ o } A_{n^*+1}$$

viene dada por:

$$m + m + \cdots + m + m > 1/n^* + 1/n^* + \cdots + 1/n^* + 1/n^* = (n^* + 1)\cdot 1/n^* = 1 + 1/n^*,$$

donde cada suma incluye $n^* + 1$ términos. Pero semejante resultado es imposible, ya que ningún suceso puede ocurrir con una probabilidad mayor que uno.

Podemos considerar numerosos ejemplos de eventos posibles cuya probabilidad, en virtud de lo anterior, solo puede ser cero. Imaginemos un dardo infinitamente delgado. Si lo lanzamos contra una diana, podrá acertar con igual probabilidad en cualquiera de sus puntos, aunque solo en uno cada vez. Por tanto, dado que en la diana hay infinitos puntos, podemos concluir que la probabilidad de que caiga cualquiera de ellos ha de ser nula.

¿Probabilidades infinitesimales?

Tal vez podríamos concluir que la teoría matemática que empleamos para medir la probabilidad es incompleta, ya que no toma en cuenta ciertas distinciones entre sucesos que no podemos ignorar.

Por ejemplo, la probabilidad de obtener una serie infinita de caras debería resultar mayor que la probabilidad de obtener una cara y una cruz al mismo tiempo. La segunda opción no solo es improbable, sino *imposible*: jamás puede ocurrir. Sin embargo, la teoría clásica de la probabilidad, formulada en términos de números reales comprendidos entre 0 y 1, trata los dos sucesos como si fuesen del mismo tipo. Al asignar a ambos probabilidad cero, estamos ignorando una diferencia fundamental entre ellos.

¿Qué hacer? Tal vez cabría emplear otro tipo de objetos para medir la probabilidad de ciertos eventos aleatorios: un sistema numérico que nos permita hablar de números muy pequeños —menores que cualquier número real positivo— pero que, sin embargo, sean mayores que cero. Tales números deberían satisfacer la siguiente propiedad: si ε denota uno de esos objetos, entonces, para cualquier número natural n:

$$\varepsilon \cdot n < 1 .$$

Esto nos permitiría considerar un número infinito de eventos incompatibles

y equiprobables, cada uno de los cuales podría ocurrir con una probabilidad mayor que cero.

Al mismo tiempo, nuestra nueva clase de objetos debería comportarse como los números reales tanto como fuese posible. Sería un desastre si, al tratar de solucionar el problema de eventos posibles con probabilidad cero, nos encontrásemos con que hay eventos incompatibles E y F tales que la probabilidad de que ocurra E o F no es igual a la probabilidad de que suceda F o E. Por tanto, deberemos garantizar que la adición siga siendo conmutativa: si m y n denotan dos números cualesquiera, incluso si alguno de ellos es uno de los números especiales, entonces:

$$m + n = n + m.$$

Otro de los principios fundamentales de la teoría de la probabilidad nos dice que, si E y F son dos sucesos independientes, la probabilidad de que ocurran E y F a la vez viene dada por el producto de las probabilidades individuales. Por tanto, desearíamos asimismo que la multiplicación siguiese siendo conmutativa, ya que solo así podremos garantizar que la probabilidad de que sucedan E y F sea igual a la probabilidad de que ocurran F y E.

Lo que acabamos de describir va más allá de una mera hipótesis. Existe una teoría, el análisis no estándar, que nos permite hacer matemática bajo el supuesto de que existen números positivos menores que cualquier número real. Dicha teoría fue concebida en los años sesenta del siglo XX por el matemático Abraham Robinson, quien demostró que, si la teoría clásica de los números reales no nos permite demostrar ninguna contradicción, entonces ha de existir una estructura matemática que contiene números positivos infinitamente pequeños (y que verifica todos los enunciados de la teoría clásica que se pueden formular en un lenguaje de primer orden). Dichos números reciben el nombre de *infinitesimales*.

Sucesos improbables e imposibles: Si lanzamos una moneda un número infinito de veces, podemos preguntarnos por la probabilidad de obtener una sucesión infinita de caras. Dicho evento se diferencia de manera fundamental de otros, como obtener una cara y una cruz al mismo tiempo: el primero resulta muy improbable, pero el segundo es imposible. Sin embargo, la teoría clásica asigna a ambos una probabilidad nula. ¿Es por ello una teoría incompleta?



De vuelta a la moneda

Así pues, parece que contamos con los elementos necesarios para desarrollar una teoría matemática que nos permita asignar a ciertos sucesos una probabilidad infinitesimal, pero mayor que cero.

Sin embargo, quizá las apariencias engañen. Supongamos que A denota el evento que consiste en obtener una sucesión infinita de caras; B, el suceso correspondiente a conseguir una serie infinita de caras a partir del segundo lanzamiento, y C_1, el asociado a obtener una cara en el primer lanzamiento. Resulta evidente que la probabilidad de A, $P(A)$, debe venir dada por $P(A) = P(C_1 \text{ y } B)$.

Ahora bien, los eventos C_1 y B son independientes: obtener una cara en el primer lanzamiento no afecta a lo que ocurra a partir del segundo. Por tanto, tenemos que $P(A) = P(C_1) \cdot P(B)$. Y dado que la probabilidad de obtener una cara en el primer lanzamiento es igual a 1/2, podemos concluir que $P(B) = P(A) + P(A)$.

Pero ¿cómo es posible que la probabilidad de B no resulte idéntica a la de A? Supongamos que una máquina se programa para lanzar una moneda una vez al día. En un universo que nunca llegue a su fin, la probabilidad de que la máquina obtenga cara todos los días (un número infinito de ellos) no puede depender del día concreto en que el proceso se puso en marcha.

Supongamos ahora que una máquina, M, comienza a lanzar sus monedas el día 1 de enero de 2014. Otra máquina idéntica, N, se pone en marcha el día después. La probabilidad de que todos los lanzamientos de M a partir del 2 de enero caigan cara ha de ser igual a la probabilidad de que todos los lanzamientos de N salgan cara. Por tanto, la probabilidad de obtener una cara en el segundo lanzamiento y en todos los siguientes (lo que antes llamamos evento B) debe ser igual a la probabilidad de obtener cara en todos los lanzamientos, incluyendo el primero.

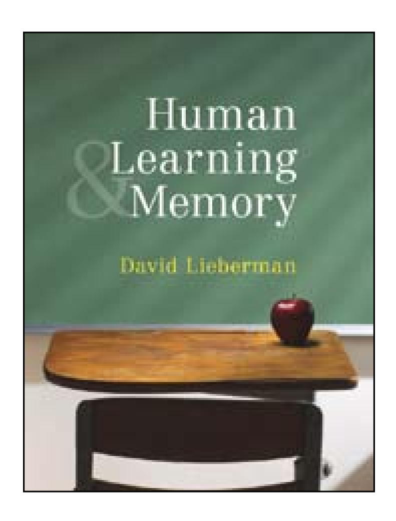
Volviendo a la notación previa, tendríamos que $P(A) = P(B)$. Sin embargo, antes hemos demostrado que $P(B) = P(A) + P(A)$. Ello implica que $P(A)$ solo puede ser cero, ya que este es el único número —infinitesimal o no— que satisface la ecuación $x = x + x$.

¿Acaso jamás podremos garantizar que solo los eventos imposibles tengan probabilidad cero?

PARA SABER MÁS

El argumento de la última sección se debe a Timothy Williamson: **How probable is an infinite sequence of heads?**, *Analysis*, vol. 67, n.º 3, págs. 173-180, 2007.

Edward Nelson, profesor de matemáticas en la Universidad de Princeton, introdujo la teoría de la probabilidad con números infinitesimales en **Radically elementary probability theory** (Princeton University Press, 1987). Charlie Geyer, profesor de estadística en la Universidad de Minnesota, está escribiendo una obra similar pero con muchos más detalles. La última versión se encuentra disponible en **www.stat.umn.edu/geyer/nsa/**



HUMAN LEARNING AND MEMORY,
por David A. Lieberman. Cambridge University Press; Cambridge, 2012.

Aprendizaje y memoria

Relación de dependencia mutua

El término «aprendizaje» subraya la adquisición de conocimientos y destrezas; el de «memoria», la retención de esa información. Ambos procesos se hallan inextricablemente unidos. Solo podemos determinar si alguien ha aprendido algo observando si más tarde lo recuerda; solo podemos recordar un episodio si almacenamos información sobre su datación. Imaginémonos que naciéramos sin capacidad para formar recuerdos. Nada de cuanto experimentásemos dejaría huella; no aprenderíamos a andar o a hablar, ni recordaríamos nada que nos hubiera sucedido; permaneceríamos, cual insectos aprehendidos en ámbar, presos en una mente infantil. Porque aprendemos y recordamos construimos nuestro proyecto de vida. El término «memoria» se emplea comúnmente en uno de dos sentidos, el de registro mental de nuestras experiencias y el del acto de recuperar el registro en cuestión. A la memoria que se nos ofrece como un revivir consciente de momentos específicos la denominamos episódica; la memoria semántica implica un conocimiento factual. Suele hablarse de tres estadios en el recuerdo de un episodio: codificación, almacenamiento y recuperación. La codificación remite a lo que sucede cuando experimentamos un suceso y formamos un recuerdo o código para su representación. Ese registro permanece almacenado hasta que llega el momento de recuperarlo.

Aunque hablamos de aprendizaje humano, hemos de tener en cuenta que la mayoría de los experimentos se han hecho sobre animales. Por razones obvias: es más fácil controlar el entorno animal que el de las personas y, con ello, delimitar mejor las aportaciones de las diversas variables. Mostraban, además, unos sistemas de aprendizaje más elementales, lo que facilitaba la comprensión de los procesos fundamentales. Durante decenios, la psicología estuvo dominada por los conductistas, quienes desconfiaban de las explicaciones que atribuían la conducta a estados mentales que no podían observarse; al trabajar con animales se obviaban los estados mentales para centrarse en las variables que controlaban la conducta. Resultado de todo ello, el aprendizaje se estudió tomando por modelos ratas y, más tarde, palomas. Tras la entrada en escena de la psicología cognitiva en la revolución de la disciplina de los años cincuenta y sesenta, los investigadores se persuadieron de que el conocimiento de la memoria requería desentrañar unos procesos mucho más complejos que la mera formación de asociaciones.

Los teóricos del aprendizaje han tomado prestadas ideas que emergieron en la ciencia cognitiva; así, la distinción entre procesos controlados y procesos automáticos, o los modelos de redes neurales. Por su parte, los teóricos cognitivos resaltaron el papel de procesos asociativos en la memoria. Algunos estímulos desencadenan siempre la misma reacción. Si tocamos una sartén caliente, procuraremos en adelante retirar la mano; si un ramalazo de aire azota nuestros ojos, los cerraremos en las próximas ocasiones. Cuando un estímulo desencadena una respuesta, la relación establecida se denomina reflejo. Lo que no empece que en muchos casos cambie con la experiencia la forma en que reaccionamos ante los acontecimientos. De hecho, el aprendizaje es un cambio en el comportamiento debido a la experiencia; con mayor precisión, un cambio en nuestra capacidad de comportamiento como resultado de tipos particulares de experiencias.

En el caso de la habituación, el aprendizaje se produce en la presentación de un solo estímulo. Pero el aprendizaje suele requerir dos y su razón de relación. En el condicionamiento clásico aprendemos la relación entre dos estímulos; en el condicionamiento operante (de refuerzo o castigo) aprendemos la relación entre una respuesta y su consecuencia. Para explicar el aprendizaje se recurre a la regla de Hebb, hipótesis introducida por Donald O. Hebb en su *The organization of behavior*, según la cual el emparejamiento de estímulo y recompensa provoca que las neuronas respectivas se activen y que esa excitación síncrona modifique luego la intensidad de tales conexiones (sinapsis) entre neuronas. La importancia de la regla en el aprendizaje asociativo recibió un significativo respaldo experimental con el descubrimiento de la potenciación a largo plazo, en la cual la excitación coincidente de dos neuronas interconectadas produce un vínculo más fuerte entre ellas. El correlato más claro de aprendizaje asociativo se descubrió en 2011, al identificarse la plasticidad dependiente de la temporización de la espiga (STDP, de *spike-timing-dependent plasticity*). Regulan también la plasticidad sináptica la acelticolina, serotonina, dopamina, noradrenalina y octopamina, entre otros. Tales transmisores neuromoduladores pueden potenciar o reducir la intensidad de las sinapsis. Son, por tanto, candidatos potenciales para intervenir en el aprendizaje.

Los cambios de plasticidad relacionados con el aprendizaje han recibido un tratamiento extenso en los estudios sobre la emoción en los animales. También en experimentos sobre animales se han identificado los mecanismos neuroquímicos en virtud de los cuales los fenómenos emocionales aumentan la memoria. Revelan una modulación beta-adrenérgica. La potenciación de la memoria emocional en los humanos puede inhibirse mediante la administración de propanolol, bloqueador del beta-adrenorreceptor. La amígdala influye en la neurotransmisión colinérgica en el establecimiento de trazos persistentes de memoria. Sabido es que la amígdala humana es determinante para el condicionamiento del miedo, una forma de memoria implícita. Quienes han sufrido daños en esa estructura cerebral no emiten respuestas condicionadas de miedo, pese a mantener un conocimiento explícito con respecto a las asociaciones de estímulo condicionado (EC) e incondicionado (EI). Por el contrario, los pacientes con lesiones en el hipocampo y amígdala intacta conservan el condicionamiento del miedo, no obstante mostrarse incapaces de evidenciar un conocimiento explícito respecto a las contingencias de EC-EI. Las observaciones registradas con técnicas funcionales de formación de imágenes confirman la importancia de la amígdala para el aprendizaje de las aso-

ciaciones EC-EI, aunque apuntan a una función limitada en el tiempo.

Está emergiendo una nueva teoría que se propone explicar el aprendizaje en todas sus facetas, desde el condicionamiento clásico hasta el aprendizaje del lenguaje. Mediante un principio increíblemente simple: cuando dos neuronas se muestran activas a un tiempo, la conexión entre ellas se refuerza. Se trata de la teoría conexionista o de la red neural. Cuando una neurona se estimula, se produce un impulso eléctrico que se transmite a lo largo del axón. Al llegar al terminal del axón, el impulso causa la liberación de neurotransmisores que recorren el hiato sináptico y alcanzan la neurona siguiente. La llegada de esos neurotransmisores hace que la segunda neurona produzca un impulso eléctrico y así sucesivamente. El cerebro consta de unas cien mil millones de neuronas. Cada neurona recibe información de cien mil más. Se llama red neural a una red densamente interconectada de este tenor. En terminología del mundo eléctrico, el cerebro es un sistema en paralelo, en el que numerosos sistemas operan simultáneamente. La red neural consta de un conjunto de unidades interconexas. Cuando una neurona de la red se activa, esa actividad se transmite a otras neuronas con las que se halla conectada. La intensidad de excitación transmitida entre dos neuronas depende de la fuerza de la conexión. Si dos neuronas de la red se activan al mismo tiempo, la conexión entre ellas se potenciará. A modo de contraposición típica, el bloqueo de las uniones de intervalo neuronales en el hipocampo daña aprendizaje y memoria.

—Luis Alonso



LA INTELIGENCIA EN LA NATURALEZA. DEL RELOJERO CIEGO AL AJUSTE FINO DEL UNIVERSO.

Dirigido por Francisco Rodríguez Valls. Biblioteca Nueva; Madrid, 2012.

Búsqueda sin término

Reformulando una pregunta sin respuesta

«Contéstame a una cosa» —dijo el ateo—: ¿existe realmente un Dios?»
Y le respondió el Maestro: «Si quieres que te sea sincero, no tengo respuesta».
Más tarde, los discípulos quisieron saber por qué no había respondido.
«Porque la pregunta no tenía respuesta», dijo el Maestro.
«¿De modo que eres ateo...?»
«Por supuesto que no. El ateo comete el error de negar algo de lo que no puede decirse nada.»
Y, después de una pausa, añadió: «Y el teísta comete el error de afirmarlo».

En su libro *Un minuto para el absurdo*, Anthony de Mello reflexiona de este modo sobre la posibilidad de saber acerca de la existencia de Dios. A lo largo de milenios el hombre ha intentado acercarse al problema de la existencia divina de forma racional, siempre sin éxito, pues, como dice de Mello por boca del Maestro, no se puede hablar de aquello de lo que no puede decirse nada. O, utilizando las palabras con las que Wittgenstein cerraba su *Tractatus logico-philosophicus*, «de lo que no se puede hablar se debe guardar silencio».

Sin embargo, pese a estas conclusiones tan categóricas, a las que llegamos una y otra vez, año tras año, seguimos embarcados en esa búsqueda sin límite, cuyo objeto no puede ser encontrado. ¿Es eso malo en sí? No, pero debemos ser conscientes de que es la propia búsqueda lo que tiene sentido, y nada más: en palabras de Francisco Rodríguez Valls en la presentación de *La inteligencia en la naturaleza. Del relojero ciego al ajuste fino del universo*, «este libro pretende ser uno de los que contribuyan a que ese libro último —límite ideal de una búsqueda sin término— pueda ser redactado». Es obvio que, si la búsqueda no tiene término, ese libro nunca llegará; pero supone una asíntota a la que acercarse cada vez más.

En *La inteligencia en la naturaleza* una serie de destacados pensadores emprenden, dirigidos por el citado Rodríguez Valls, esa búsqueda de nuevo. Y lo hacen empezando con buen pie, pues son, por un lado, sinceros con sus puntos de partida y, por otro, honestos con sus conclusiones. Todos ellos emprenden la búsqueda de *la inteligencia*, concepto harto difícil y que recibirá definiciones diferentes por parte de los distintos autores presentes en la obra. La inteligencia que buscan en la naturaleza no se limitará al surgimiento de capacidades intelectuales en los seres vivos y, en particular, en el hombre; indagan también si existe una inteligencia superior, previa, que haya dado lugar a su vez a la naturaleza. Es decir, se analiza cómo surge la inteligencia a partir de la naturaleza y si esta tiene su origen en otro tipo de inteligencia, una Inteligencia que podría escribirse con mayúscula y que, en ciertos momentos, es un sinónimo perfecto de Dios, como el propio texto se encarga de aclarar.

Los presupuestos de los que parte el libro son tres preguntas que el coordinador formuló a cada uno de los autores que contribuyen a la obra: ¿Contiene la naturaleza en su constitución misma o en su evolución indicios de inteligencia? ¿Existe una relación genética entre naturaleza e inteligencia, en el sentido de que la primera ha sido generada por la segunda, o la segunda por la primera, o ambas cosas a la vez, o bien ninguna de ellas? ¿Qué tipo de relación existe entre la inteligencia humana y la que puede ser atribuida a la naturaleza en algún sentido? Las preguntas son complejas, y las respuestas también lo son, como corresponde a temas tan debatidos y de tan amplio espectro. La multitud de significados que se puede atribuir a las palabras «inteligencia» y «naturaleza» también contribuye a que el punto de partida sea difícil, pues ante estas dos palabras muchas personas tienen

distintos conceptos en la cabeza aunque crean entender lo mismo, de modo que gran parte de las contribuciones están destinadas a aclarar qué se entiende en cada momento por esos conceptos —en muchas ocasiones no significan lo mismo en un texto o en otro, aunque siempre se explicita cada significado.

La mayoría de los autores son teístas, y así lo reconocen de forma expresa, algo que debemos agradecerles: no tratan en ningún momento de colar de rondón una ideología propia, sino que analizan de veras las preguntas de partida desde diferentes ópticas, y llegan a conclusiones diversas, algo que enriquece la lectura, al no pretender alcanzar una verdad unívoca.

A lo largo del libro encontramos no solo diversas posturas, sino también distintos estilos y contenidos. Entre los estilos tenemos ensayos de corte clásico, otros en forma de diálogo (el de Pedro Jesús Teruel) o reflexiones que parten de situaciones particulares experimentadas en el seno de la vida privada, como le ocurrió a Jorge Úbeda al plantearse la mejor forma de educar a sus hijos. El corte general de los capítulos es de índole filosófica, aunque algunos de ellos toman un cariz más científico, como en los casos de Francisco José Soler Gil, Francisco Rodríguez Valls y, muy particularmente, en el de Javier Montserrat.

En cuanto a los contenidos, mientras algunos artículos se aproximan a temas concretos (la relación de semejanza en el caso de Alfredo Marcos, la neurobiología de la consciencia y de la sensibilidad en el de Javier Montserrat, la moral en el de Jorge Úbeda), otros analizan la obra de autores importantes que guardan relación con el tema del libro, como ocurre con el ensayo de Juan Arana, en que se enfrenta a la conocida obra de Richard Dawkins *El relojero ciego*, o con el de Santiago Collado, que hace lo propio con la obra de Behe, Dembski, Johnson y demás proponentes de la teoría del diseño inteligente; por su parte, José María Molina debate ciertas ideas de Karl Popper, y Héctor Velázquez Fernández hace otro tanto con la obra de Mariano Artigas. Hay capítulos que se enfrentan no ya a autores, sino a corrientes enteras de pensamiento, como ocurre con Javier Hernández-Pacheco, que revisa cómo se entendía la idea de naturaleza en el romanticismo. Como ya se ha dicho, el tema del libro corresponde a una cuestión debatida durante milenios; así José Luis González Quirós puede entablar diálogo respecto al mismo con Aristóteles, como también hace Alfredo Marcos al principio de su capítulo para continuar con muchos otros autores posteriores al estagirita.

Volviendo a las palabras del Maestro de Anthony de Mello, en *La inteligencia en la naturaleza* hay ocasiones en que se puede incurrir en la audacia de negar algo de lo que no puede decirse nada, o poseer el arrojo de afirmarlo. Pero en todo momento se reconoce que la pregunta, sencillamente, no tiene respuesta: en palabras de José Domingo Vilaplana Guerrero, que cierra la obra con su capítulo, la pregunta de si es inteligente la naturaleza «se trata de una pregunta vacía, es decir, una pregunta a la que es imposible responder». Quizá precisamente por eso la búsqueda no deba nunca terminar.

—Miguel Huíneman de la Cuadra
Universidad Complutense de Madrid



EL DESTINO NO ESTÁ ESCRITO EN LOS GENES,

por Jörg Blech. Destino; Barcelona, 2012.

No todo está en los genes

La compleja relación entre genotipo, ambiente y fenotipo

El conjunto de características observables de un individuo (su fenotipo) es el resultado de la interacción entre dos componentes: el genotipo, o conjunto de información almacenada en el genoma, y el ambiente. Diferentes rasgos fenotípicos se ven influenciados en mayor o menor medida por uno u otro factor. Así, mientras una única mutación genética en un gen codificante de un factor de coagulación sanguínea puede determinar directamente la existencia de hemofilia, otros rasgos, como el peso corporal, dependen en gran medida (pero no únicamente) de factores ambientales como la alimentación y la actividad física. Las leyes que gobiernan las interacciones entre genotipo y ambiente son complejas y en gran parte desconocidas, pero a nadie se le escapa el gran interés que tiene poder desentrañarlas, sobre todo cuando el fenotipo en cuestión corresponde a una enfermedad. La base genética de numerosos trastornos llamados simples, o de herencia mendeliana, se ha descubierto. Se trata de mutaciones, como la causante de la hemofilia o la fibrosis quística, que alteran severamente la función de un gen y cuya presencia causa directamente la existencia de la enfermedad. Otras enfermedades, denominadas complejas, tienen un origen menos claro; el papel que en ellas desempeñan el genotipo y el ambiente no se conoce.

Una mirada a los titulares de prensa nos puede hacer pensar que hemos resuelto la base genética de muchas de las enfermedades complejas. No es extraño, por ejemplo, encontrar afirmaciones como la de que «se ha identificado el gen de la obesidad». Además, algunas compañías comercializan tests genéticos como si se tratase de certeros predictores de nuestros riesgos de padecer un sinfín de enfermedades. En *El destino no está escrito en los genes*, Jörg Blech, biólogo de formación pero que se dedica al periodismo desde hace años, argumenta que esa imagen es falsa y peligrosamente engañosa. En su libro, escrito como un alegato en contra del «determinismo genético», Blech denuncia un hecho cierto: la exageración sobre lo que sabemos de las bases genéticas de las enfermedades complejas y la minimización del efecto del ambiente. Contrarresta esta visión mediante la enumeración de estudios que muestran el efecto del ambiente sobre determinados fenotipos complejos como la obesidad, la inteligencia o la salud cardiovascular. Esos estudios

confirman un efecto importante del ambiente sobre algunos fenotipos; aportan, por tanto, una visión positiva de lo que podemos hacer por mantenernos sanos a pesar de los posibles riesgos codificados en nuestros genes.

Sin embargo, en su afán por contrarrestar la visión centrada en las causas genéticas y aportar la influencia del ambiente, Blech cae, en numerosos pasajes, en la misma exageración que él mismo critica. Mientras los estudios que muestran bases genéticas son analizados de una manera muy crítica, siendo considerados incluso artefactos, los que apuntan a un efecto del ambiente son descritos con un entusiasmo desaforado, minimizando el posible efecto que, pese a la importancia del ambiente, puedan seguir desempeñando los genes. Este empeño en buscar un ganador entre los genes y el ambiente, en describir la compleja realidad mediante contrastes de blancos y negros, resulta peligroso, ya que la realidad tiene claros y oscuros, así como numerosos grados de grises.

¿Qué conocemos sobre la genética de las enfermedades complejas? La disponibilidad del genoma humano, así como los avances en la determinación del genotipo por medio de técnicas masivas, despertó grandes expectativas sobre nuestra capacidad de desentrañar las bases genéticas de estos trastornos. Para ello se diseñaron investigaciones ambiciosas y bastante costosas que caracterizaban simultáneamente la presencia de miles de variantes genéticas en grandes grupos de individuos. Estos estudios de asociación a escala genómica (GWAS, por sus siglas en inglés) pretendían encontrar variantes genéticas asociadas estadísticamente con la presencia o no de una enfermedad compleja. Se encontraron miles de variantes asociadas, que se relacionaron con un mayor riesgo de padecer la enfermedad, si bien la mayoría explicaba solo una parte reducida de la variación observada. Como resultado, la presencia o no de una serie de variantes asociadas con una enfermedad suele tener un valor predictivo muy escaso sobre el desarrollo de la misma. En este hecho se basa Blech para tirar por tierra no solo la utilidad de estos estudios, sino también para obviar la posible base genética de estos trastornos.

Pero un bajo poder predictivo no significa una carencia de utilidad. Las más de 2000 variantes asociadas con enfermedades complejas, que se han descubierto en unos pocos años, apuntan a genes y rutas metabólicas relacionadas con procesos relevantes para estas afecciones. Por tanto, aunque no sepamos predecir con exactitud si una persona desarrollará obesidad mórbida a lo largo de su vida, por ejemplo, sí que entendemos ahora algo más de las bases fisiológicas de dicha enfermedad.

Por otro lado, un bajo poder predictivo del genotipo no indica una falta de base genética. Poder explicar cierto porcentaje de la incidencia de una dolencia a partir del genotipo (del 20 al 50 por ciento en algunos casos) indica la existencia de un factor genético importante que no podemos obviar. El resto de la

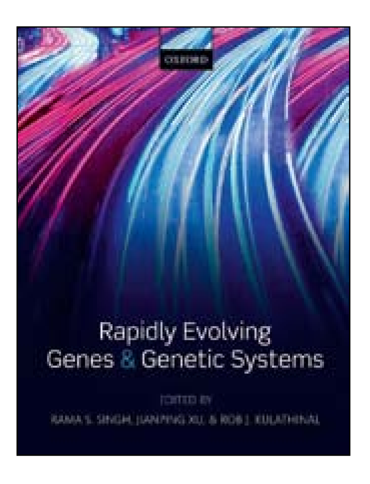
variación puede deberse desde luego a factores ambientales, pero también a causas genéticas que se escapan al nivel de resolución de los estudios actuales. Los estudios de asociación se diseñaron para encontrar variantes genéticas que fueran comunes en la población, una parte pequeña de todas las existentes. Además, genotipos causales pero consistentes en múltiples combinaciones de varias mutaciones escaparían también a la detección en estos estudios.

Ciertamente, los intentos de asociar causas genéticas a numerosas enfermedades complejas han arrojado resultados modestos, que han sido exagerados por muchos, generando una percepción errónea de nuestra capacidad de predecir la propensión a padecer ciertos trastornos. Hace bien Blech en recordarnos las limitaciones de estas investigaciones y la importancia de los factores ambientales, generalmente controlados pobremente en los estudios de asociación.

Sin embargo, la existencia de bases genéticas sigue estando ahí, como demuestran los trabajos basados en gemelos idénticos mencionados por Blech mismo. Todo ello es compatible con un importante papel del ambiente, desde luego, sobre todo en enfermedades que se desarrollan a lo largo de nuestra existencia. En última instancia, los mecanismos mediante los cuales respondemos al ambiente también se hallan codificados en nuestro genotipo. Esto incluye los que aseguran la plasticidad de nuestro cerebro, o los que permiten corregir daños causados por toxinas o radiaciones a las que estamos expuestos. También los mecanismos de modificación epigenética, como la metilación del material genético, que alteran la regulación de los genes (no su secuencia) en respuesta al ambiente.

No podemos entender por completo las enfermedades complejas sin considerar la contribución necesaria de genotipo y fenotipo. Dicha relación fue ilustrada por Francis Collins de la siguiente manera: «El genotipo pone la pistola y el ambiente aprieta el gatillo».

—Toni Gabaldón
Centro de Regulación Genómica, Barcelona



RAPIDLY EVOLVING GENES & GENETIC SYSTEMS.

Dirigido por Rama S. Singh, Jianping Xu y Rob J. Kulathinal. Oxford University Press; Oxford, 2012.

Teoría de la evolución

Aportaciones sobre la celeridad del mecanismo

La teoría de la selección natural que Charles Darwin y Alfred Wallace propusieron de consuno había de explicar el origen y evolución de la diversidad biológica. Esa coincidencia se rompió a propósito del dimorfismo en los caracteres sexuales secundarios. Darwin atribuía la evolución de los caracteres sexuales secundarios en apariencia mal adaptados, como la cola del pavo real, a la selección sexual, es decir, a las estrategias que posee cada sexo para aumentar su ventaja reproductiva; distinguía entre selección natural y selección sexual. Wallace incluía la adquisición de los caracteres sexuales secundarios en la obra de la selección natural. (Les separaron otros asuntos de alcance, como la interpretación del origen del hombre y la interpretación de la esterilidad de los híbridos.)

Desde entonces, los biólogos no han dejado de investigar en la dinámica evolutiva de los sistemas genéticos. Fruto de ello ha sido el largo elenco de teorías sobre la celeridad de la evolución, desde la tesis estática hasta la cuántica, pasando por la gradual y la de los equilibrios puntuados. Muchas se apoyaban en la comparación de los cambios de los rasgos morfológicos en el transcurso de escalas temporales geológicas, según quedan reflejados en el registro fósil. Pero de un tiempo a esta parte se va abriendo camino una nueva forma de contemplar las pautas y los procesos evolutivos, donde los datos paleontológicos se suman a los experimentales, moleculares, genómicos, celulares, de desarrollo y poblacionales. Ha transformado de raíz nuestra interpretación de la disciplina al conceder importancia principal a los sistemas genéticos de evolución célere.

El *tempo* y *modo* de evolución conforman nuestro conocimiento de los procesos y sistemas fundamentales de la vida. Durante largo tiempo se aceptó un esquema simplificado de evolución, recibido como axioma por generaciones de biólogos que siguieron a Darwin; a saber: un proceso de cambio lento y continuo que resultaría de la acumulación constante de ligeras modificaciones hereditarias en el transcurso de millones de años. Junto con la variación y la adaptación, el carácter gradual del proceso se incrustó en el núcleo de la teoría evolutiva. Se presentaba verosímil, pues no observamos cambios evolutivos discernibles durante nuestro propio intervalo de vida, ni es de esperar que veamos en la fluctuación del medio una dirección neta de su fluctuación; además, la inmensidad de la escala temporal evolutiva, percibida desde el registro fósil, abonaba ese ritmo parsimonioso.

Aunque no faltaron voces discrepantes. Treinta años después de la aparición del *Origen de las especies*, es decir, en 1889, Wallace declararía que Darwin tendía a exagerar la lentitud de la acción de la selección natural. Y apostillaba que, con la exuberancia de datos ya disponibles, no parecía difícil admitir una similar intervención de cambios rápidos subsecuentes a adaptaciones súbitas. El propio Thomas Huxley, acérrimo defensor de la nueva teoría de Darwin, le censuraba haberse enredado en la innecesaria dificultad de haber adoptado sin más la tesis de que *natura non facit saltum*.

Si tomamos 1900, con el redescubrimiento de las leyes de Mendel, como el origen de la genética moderna, advertiremos que el mecanismo aceptado por la genética evolutiva y la selección bajo domesticación permaneció inalterado medio siglo largo. A principios de los

años veinte, el gradualismo se abrió camino hacia los mecanismos subyacentes, saltando del fenotipo al genotipo determinante. Ronald Fisher aportó el andamiaje teórico de la evolución gradual sobre la base de que las micromutaciones posibilitarían que los cambios evolutivos acontecieran parsimoniosamente sin destruir las adaptaciones facilitadas por macromutaciones. Respondía así a las tesis transformistas de Hugo DeVries y William Bateson. A Fisher se le sumaron Sewall Wright y J. B. S. Haldane, con sus respectivas escuelas de genética de poblaciones, en la construcción de un marco teórico basado en un modelo de grandes números de *loci* génicos mendelianos, independientes (no ligados). Ese armazón conceptual servía para dar cuenta de las variaciones observadas en la naturaleza y pergeñar proyectos de selección artificial en la agricultura; resultaba, pues, una herramienta útil para genéticos de poblaciones y mejoradores de plantas y animales. Encajaba, además, con la estructura general de la teoría y las observaciones paleontológicas que resaltaban la evolución gradual e incesante evidenciada, se decía, en el registro fósil.

Pero comenzaron a desentrañarse numerosos mecanismos que cuestionaban esa tesis imperante. Iniciada la reforma en la segunda mitad del siglo, la atmósfera empezó a clarearse con la molecularización de la genética, el descubrimiento de la movilidad de elementos génicos en el seno del genoma, los mecanismos de movilidad de la información de la secuencia del ADN entre genomas y la variación de las reglas del tránsito de copias de un gen de un organismo a otro y de una generación a otra. No valían, para entender la evolución, en la naturaleza y bajo domesticación, los modelos clásicos apuntalados sobre factores mendelianos discretos. Como dirá Richard Lewontin, su *The genetic basis of evolutionary change,* que dependía enteramente de la variabilidad alélica en las poblaciones, resultaba incompleta y no ofrecía respuesta cabal al programa implicado en el título.

A medida que los organismos evolucionan, lo hacen acompasados con los nichos. No cabe evolución de la especie si no existe la posibilidad de recrear su nicho de una manera correspondiente. De esto y de lo antes expuesto hemos de inferir que hay factores internos y externos que limitan y, en parte, determinan el ritmo de evolución de una especie. Habida cuenta de la complejidad de dicha dependencia, no parece razonable esperar que los ritmos evolutivos se mantengan constantes a lo largo del tiempo para una línea filética particular. Como admitía G. G. Simpson en su *Tempo and mode in evolution*, los ritmos diferenciales de cambio dentro de cualquier línea evolutiva y las diferencias en la celeridad entre ramas emparentadas de un árbol evolutivo constituyen un rasgo universal de toda evolución.

Además, la teoría de genética de poblaciones sugería que la mayoría de los linajes no soportarían una evolución rápida y continua durante períodos de tiempo largos. Antes o después, la falta de variación genética y de oportunidad terminarían por ralentizar el ritmo del cambio. Cualquier evolución rápida sería de naturaleza intermitente, escasa y lejana en tiempos geológicos, a la manera de la teoría saltacionista de Gould. La evolución gradual se nos ofrecería como una realidad geológica. El gradualismo halló su gran aliado en la teoría neutralista (mutaciones neutras) de la evolución molecular avanzada en 1968 por Motoo Kimura. Abogaba por la existencia de un mecanismo molecular de relojería en el cambio evolutivo, que operaría a diferentes escalas de tiempo y a través de genes y especies. Al propio tiempo, fue haciéndose evidente que las posiciones del tercer codón, las regiones intergénicas, la duplicación génica, las familias multigénicas, el ADN satélite y los pseudogenes constituían ejemplos de elementos genéticos que evolucionaron a un ritmo más rápido debido a menores restricciones selectivas.

Todos los eucariotas complejos comparten apareamiento y reproducción sexual entre individuos de la misma especie. Ese modo de reproducción permite el intercambio y la recombinación, al tiempo que aporta un medio para salvaguardar la integridad de las poblaciones ante la invasión de elementos genéticos foráneos. No ocurre así en los procariotas, aunque en estos el intercambio genético entre organismos lejanamente emparentados puede llegar a través de la transformación, traducción y conjugación. Los análisis de la secuencia genómica de bacterias y arqueas han mostrado que la transferencia horizontal constituye una fuerza importante en la conformación del tamaño del genoma procariota y del contenido génico, amén de desempeñar un papel importante en la adaptación y supervivencia a largo plazo de esos organismos. La transferencia génica horizontal permite la adquisición rápida de genes novedosos: si los genes en cuestión potencian la supervivencia y reproducción de la célula hospedante, serán retenidos por su genoma; si los elementos génicos recién adquiridos no son beneficiosos, degenerarán rápidamente y serán prestamente eliminados del genoma. La transferencia génica horizontal suele circunscribirse a una pequeña región genómica; no implica la activación de todo el genoma, típica de la reproducción sexual de los eucariotas.

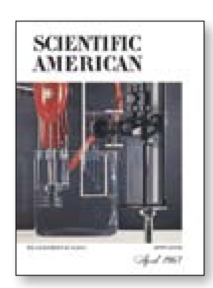
Los cambios operados en la regulación génica (la variación en cantidad y tiempo de expresión génica y en distribución de los tejidos) han sido considerados siempre una fuente de rápido cambio fenotípico. El gran debate sobre la regulación génica comenzó en 1975, cuando se llegó a la conclusión de que los humanos y los chimpancés divergieron de un antepasado común hace entre cinco y siete millones de años, frente a los 30 que se creía hasta entonces. ¿Cómo pudieron los humanos y los chimpancés diferir tanto y compartir un precursor tan cercano? Los cambios reguladores génicos tienen el potencial de producir cambios fenotípicos rápidos, pero solo si las circunstancias del entorno lo posibilitan.

En el ritmo de evolución intervienen otros factores. La influencia es más intensa si los organismos se hallaban más estrechamente emparentados en sus respectivos ciclos biológicos. Y eso es precisamente lo que ocurre en la coevolución, que implica la interacción de socios: huésped-parásito, depredador-presa y polinizador-plantas. En tales sistemas acoplados, los ritmos de evolución pueden, en principio, ser más lentos o más veloces. Si más veloces, esos ritmos pueden acelerarse con extrema rapidez.

Los grandes movimientos de poblaciones y geográficos pueden conducir también a un cambio rápido y episódico. La especiación peripátrica de Ernst Mayr constituye una extensión popular del modelo alopátrico de especiación, en el que se encuentran implicadas pequeñas poblaciones de la periferia de la distribución de las especies. La combinación de un tamaño pequeño de la población y una variación ambiental más extrema instan cambios genéticos rápidos en lo que se dio en llamar especiación por revolución genética. A su vez, la expansión del nicho o la disponibilidad de nuevos nichos encierra el potencial de iniciar una evolución rápida. Pensemos en la célere transformación de los mamíferos tras la extinción de los dinosaurios.

—Luis Alonso

Recopilación de Daniel C. Schlenoff



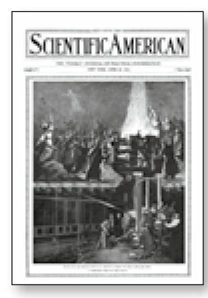
Abril 1963

Deriva continental

«En 1912, Alfred Wegener planteó que los continentes se habían originado de la fragmentación de un único supercontinente. Tal idea no ha sido aceptada por todos, pero nuevos datos sugieren que su fundamento es correcto. En el abanico de opiniones se distinguen dos posiciones totalmente opuestas: la que sostiene que la Tierra ha sido rígida a lo largo de toda su historia, con unas cuencas oceánicas y unos continentes fijos, y la que defiende que la Tierra es ligeramente plástica, con unos continentes que se mueven en una deriva lenta por su superficie, fracturándose y uniéndose otra vez, y acaso creciendo durante el proceso. Mientras que la primera de estas ideas ha gozado de una aceptación más amplia, hoy se halla en auge el interés por la deriva de los continentes.»

Transistor óptico

«El arseniuro de galio, el cristal que tanta importancia ha cobrado últimamente para la fabricación del dispositivo amplificador de luz llamado láser, se está empleando ahora para construir el análogo óptico del transistor de uniones, un dispositivo amplificador o conmutador de señales eléctricas. La ventaja del transistor óptico radica en que la luz atraviesa la base con mucha más rapidez que los electrones. En un transistor clásico, para conseguir una alta velocidad (o alta frecuencia), la base debe construirse de una extrema delgadez para minimizar el tiempo de viaje de la señal, una tarea costosa y difícil de realizar. Tan extrema delgadez resulta innecesaria en el transistor óptico.»



Abril 1913

Después de los combustibles

«Dentro de pocos siglos, las minas de carbón del planeta se habrán agotado. ¿De dónde extraeremos la energía para accionar las ruedas de la industria? Pensamos que de la propia naturaleza. Mucho antes de que hiciéramos balance de nuestras provisiones de combustible y descubriéramos que debemos administrar las escasas que nos quedan, los soñadores de la ciencia ya se habían preguntado si podrían aprovecharse de algún modo de las fuerzas naturales. Ya estamos empleando en buena medida la energía de las aguas, conocida como "carbón blanco". Las mareas nos han aportado cierta energía, igual que el oleaje. Resulta interesante observar lo que hacen nuestros inventores con vistas al futuro. La portada del presente número (*véase la figura*) ilustra un ejemplo (el artilugio se está instalando en Venecia, California) elegido al azar entre centenares de patentes.»



Motor de olas: uno de los muchos diseños para aprovechar los recursos naturales, 1913.

SCIENTIFIC AMERICAN, VOL. CVIII, N.º 14, 5 DE ABRIL DE 1913

Curiosidades extranjeras

«Hama, la Hamath de la Biblia, una de las ciudades más antiguas de Siria, se ubica en el valle del Orontes, a unos 175 kilómetros al norte de Damasco. El río Orontes la atraviesa describiendo una S, y en sus orillas se alzan cuatro enormes norias, cada una de las cuales lleva el nombre de su dueño. Se emplean para extraer agua de riego y también para abastecer la ciudad. La mayor de ellas tiene un diámetro de más de 21 metros y los sirios afirman que es la más grande que existe. Como las otras, está construida de madera, caoba negra, con el eje de hierro. El chirriar de las cuatro no cesa ni de día ni de noche; nunca paran.»



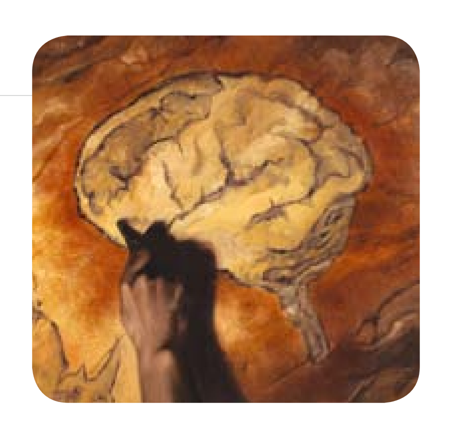
Abril 1863

Lo que vale una pradera

«Resulta singular que lo que en Illinois fueran vastas praderas sin árboles, hace doce años, hoy se halle cubierto de una densa masa de árboles jóvenes y explotables, entre los que se incluyen distintas especies de robles, álamos, nogales, fresnos y otros. Con tal rapidez se ha producido el cambio en numerosas localidades, que donde se asentaron algunos de los primeros colonos, hace de veinte a veinticinco años, sin un solo árbol a la vista, ahora se labran maderos de construcción de hasta un pie cuadrado. La tierra de las praderas, librada de la quema anual a la que cada otoño la sometían antes los indios, no tarda en producir vegetación arbórea. Algunos de los ciudadanos más antiguos, que a su llegada al país buscaron codiciosos las tierras maderables y no se preocuparon de adquirir llanuras, ahora descubren que estas valen más que aquellas; su madera ha crecido más deprisa de lo que se aprovechaba.»

Papel japonés

«El doctor McGowan, en una reciente conferencia sobre costumbres japonesas, mostró un abrigo de papel, perfectamente resistente y utilizable. En Estados Unidos tenemos cuellos de papel; en Japón llegan más lejos y emplean pañuelos de papel, muy suaves y de una textura muy fina. Pero los japoneses son más delicados que nosotros en un aspecto; tras usar un pañuelo, lo tiran y así ahorran molestias a la lavandera.»

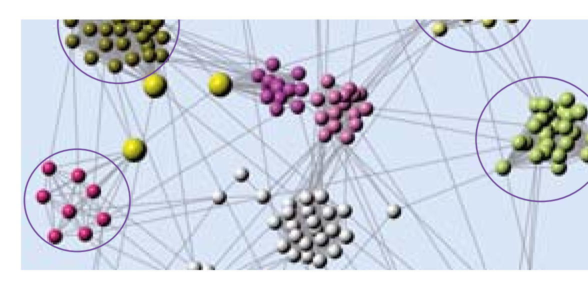


EVOLUCIÓN HUMANA

Los orígenes de la creatividad

Heather Pringle

Nuevas pruebas del ingenio de nuestros antepasados obligan a los expertos a reconsiderar en qué momento estos empezaron a pensar con inventiva.



SISTEMAS COMPLEJOS

Lenguaje, redes y evolución

Ricard V. Solé, Bernat Corominas-Murtra y Jordi Fortuny

La teoría de redes y la física de sistemas complejos aportan nuevas pistas sobre los orígenes y la evolución del lenguaje.

ENFERMEDADES EMERGENTES

La nueva amenaza de los poxvirus

Sonia Shah

La viruela puede haber desaparecido, pero sus primos víricos, la viruela del simio y la bovina, están organizando su regreso.



ASTROFÍSICA

La vida interior de los cúmulos estelares

Steven W. Stahler

Todas las estrellas nacen en grupos, pero después se dispersan lentamente por el espacio. Una nueva teoría intenta explicar el modo en que estos grupos se forman y se deshacen, o, en casos excepcionales, persisten durante cientos de millones de años.

INVESTIGACIÓN Y CIENCIA

DIRECTORA GENERAL Pilar Bronchal Garfella
DIRECTORA EDITORIAL Laia Torres Casas
EDICIONES Anna Ferran Cabeza, Ernesto Lozano Tellechea, Yvonne Buchholz, Carlo Ferri
PRODUCCIÓN M.ª Cruz Iglesias Capón, Albert Marín Garau
SECRETARÍA Purificación Mayoral Martínez
ADMINISTRACIÓN Victoria Andrés Laiglesia
SUSCRIPCIONES Concepción Orenes Delgado, Olga Blanco Romero

EDITA

Prensa Científica, S.A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344 Fax 934 145 413
e-mail precisa@investigacionyciencia.es
www.investigacionyciencia.es

SCIENTIFIC AMERICAN

SENIOR VICEPRESIDENT AND EDITOR IN CHIEF Mariette DiChristina
EXECUTIVE EDITOR Fred Guterl
MANAGING EDITOR Ricki L. Rusting
MANAGING EDITOR, ONLINE Philip M. Yam
DESIGN DIRECTOR Michael Mrak
SENIOR EDITORS Mark Fischetti, Christine Gorman, Anna Kuchment, Michael Moyer, Gary Stix, Kate Wong
ART DIRECTOR Jason Mischka
MANAGING PRODUCTION EDITOR Richard Hunt

PRESIDENT Steven Inchcoombe
EXECUTIVE VICE PRESIDENT Michael Florek
VICE PRESIDENT AND ASSOCIATE PUBLISHER, MARKETING AND BUSINESS DEVELOPMENT Michael Voss

DISTRIBUCIÓN
para España:
LOGISTA, S. A.
Pol. Ind. Pinares Llanos - Electricistas, 3
28670 Villaviciosa de Odón (Madrid)
Teléfono 916 657 158

para los restantes países:
Prensa Científica, S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª - 08021 Barcelona

PUBLICIDAD
Aptitud Comercial y Comunicación S. L.
Ortigosa, 14
08003 Barcelona
Tel. 934 143 344 - Móvil 653 340 243
publicidad@investigacionyciencia.es

SUSCRIPCIONES
Prensa Científica S. A.
Muntaner, 339 pral. 1.ª
08021 Barcelona (España)
Teléfono 934 143 344
Fax 934 145 413
www.investigacionyciencia.es

Precios de suscripción:

	España	Extranjero
Un año	65,00 €	100,00 €
Dos años	120,00 €	190,00 €

Ejemplares sueltos: 6,50 euros

El precio de los ejemplares atrasados es el mismo que el de los actuales.



COLABORADORES DE ESTE NÚMERO

Asesoramiento y traducción:

Sara Arganda: *El archivo de la memoria*; Fabio Teixidó: *Meteoritos primitivos, La corriente del Golfo y el invierno europeo y La espiral de muerte del Ártico*; Carlos Lorenzo: *Una historia intrincada*; Juan Manuel González Mañas: *El mito de los antioxidantes*; Núria Estapé: *La sabiduría de los psicópatas*; Emilio Elizalde: *Púlsares y ondas gravitacionales*; Andrés Martínez: *Juegos de caparazones y ¿Cuáles son los seres vivos más longevos?*; Xavier Roqué: *Una industria de los orígenes*; Bruno Moreno: *Apuntes e Importación y exportación del agua*; Luis Bou: *Riesgos en alza*; Gemma Reguera: *Cables eléctricos bacterianos*; Juan José Sáenz: *Rayos láser tractores*; Jesús M.ª Vázquez Cobos: *Proteómica dirigida*; J. Vilardell: *Curiosidades de la física y Hace...*

ISSN 0210136X Dep. legal: B-38.999-76

Imprime Rotocayfo (Impresia Ibérica) Ctra. N-II, km 600
08620 Sant Vicenç dels Horts (Barcelona)

Printed in Spain - Impreso en España